



TESIS - TM 142501

**STUDI PENGARUH PERUBAHAN BENTUK DAN POSISI
PEREDAM ELASTOMER PADA SISTEM PENYANGGA
TERHADAP RESPON GETARAN MODEL STRUKTUR
TURBIN ANGIN**

**ELISA SULISTYORINI
021116 5005 0001**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.
NIP. 19750511199903 1 001**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG STUDI DESAIN SISTEM MEKANIKAL
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



THESES - TM 142501

**STUDY OF SHAPE MODIFICATION DAMPER AND
ELASTOMER POSITION INFLUENCES FOR VIBRATION
RESPONSE ON SUPPORT SYSTEM OF WIND TURBINE**

**ELISA SULISTYORINI
021116 5005 0001**

**SUPERVISOR
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.
NIP. 19750511199903 1 001**

**MAGISTER PROGRAM
MECHANICAL SYSTEM DESIGN
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Elisa Sulistyorini
NRP. 021116 5005 0001


Tanggal Ujian : 25 Juli 2018
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:


1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 19750511 199903 1 001



2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19510605 197803 1 002


3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. (Penguji)
NIP. 19650810 199102 1 001


4. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji)
NIP. 19700412 199703 2 003



Dekan Fakultas Teknologi Industri,


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 19690507 199512 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tesis saya dengan judul “**STUDI PENGARUH PERUBAHAN BENTUK DAN POSISI PEREDAM ELASTOMER PADA SISTEM PENYANGGA TERHADAP RESPON GETARAN MODEL STRUKTUR TURBIN ANGIN**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya saya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap di Daftar Pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Surabaya, 25 Juli 2018

Elisa Sulistyorini
NRP: 02111650050001

(halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDI PENGARUH PERUBAHAN BENTUK DAN POSISI PEREDAM ELASTOMER PADA SISTEM PENYANGGA TERHADAP RESPON GETARAN MODEL STRUKTUR TURBIN ANGIN

Nama Mahasiswa : Elisa Sulistyorini
NRP : 02111650050001
Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Angin dapat digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik. Kerusakan pada turbin angin biasanya terjadi pada pondasi yang diakibatkan momen yang menerpa turbin. Hal ini yang menyebabkan terjadinya getaran pada turbin angin. Salah satu cara untuk mengurangi respon getaran turbin angin adalah dengan menambahkan kontrol pasif getaran yang berupa elastomer yang diletakkan di bawah pondasi turbin angin. Biasanya elastomer digunakan sebagai pereduksi getaran pada bangunan.

Pada penelitian ini, elastomer digunakan sebagai pereduksi getaran pada pondasi turbin angin yang divariasikan bentuk dan jaraknya. Sehingga nantinya dapat diaplikasikan sebagai peredam turbin angin secara sebenarnya dengan membandingkan rasio kekakuan elastomer skala lab dengan elastomer sebenarnya. Variasi bentuk elastomer terdiri silinder dan taper dengan masing-masing variasi berjumlah 4 buah elastomer. Variasi posisi elastomer (a) adalah 120 mm dan 40 mm. Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi dan eksperimen skala lab yang saling berkaitan. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian eksperimen dan dibandingkan dengan simulasi. Simulasi awal dilakukan untuk menentukan dimensi model eksperimen skala lab. Setelah dimensi diketahui, dibuat model eksperimen dan kemudian dilakukan pengambilan data eksperimen dilanjutkan dengan pengambilan data secara simulasi dan kemudian dibandingkan kedua hasil tersebut.

Dengan dilakukannya penelitian ini, dapat diketahui perbedaan respon dinamis getaran rotasional dari masing-masing variasi bentuk dan posisi elastomer dan kemudian diketahui bentuk dan posisi yang tepat untuk mereduksi getaran. Pada simulasi, kemampuan mereduksi getaran paling efektif dengan menggunakan elastomer berbentuk kotak ketika elastomer diletakkan pada jarak $a=12$ cm. Besarnya presentase mereduksi getaran untuk elastomer kotak yang diletakkan pada posisi $a=12$ cm adalah 60.66%. Sedangkan pada eksperimen, kemampuan mereduksi getaran paling besar adalah 12 cm.

Keywords: Wind Turbine, Elastomeric Rubber, Vibration Absorber.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF SHAPE MODIFICATION DAMPER AND ELASTOMERIC POSITION INFLUENCES FOR VIBRATION RESPONSE ON SUPPORT SYSTEM OF WIND TURBINE

Student Name : Elisa Sulistyorini
Student Identity Number : 02111650050001
Supervisor : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Wind can be used to drive turbines to generate electrical energy. Damage of the wind turbine occurs on the foundation caused by the moment that blends the turbine. The phenomenon causes vibration in the wind turbine. The solution to reduce the vibration response of wind turbine is added a passive vibration control in the form of an elastomer placed below the wind turbine foundation. Elastomers are used as vibration reducers in buildings.

Elastomeric rubber are used in this research as vibration reducers on wind turbine foundations, which are varied in shapes and distances. The purpose for the future, the elastomeric rubber can be applied as a real wind turbine damper by comparing the ratio of lab-scale elastomeric rubber stiffness with the actual. Variation of elastomeric forms consist of cylinders and tapers with each variation has 4 pieces of elastomeric rubber. The elastomer position variations (a) are 12 cm mm and 4 cm. This research was conducted by experimental testing and compared with simulation. Initial simulations were performed to determine the dimensions of the lab-scale experimental model. The dimensions are known, experimental models are modeled and then experimental data retrieval followed by simulated data collection and then compared the two results.

From this research, the difference of dynamic vibrational vibration response from each variation of shapes and elastomeric rubber positions are known. The right shape and position to reduce vibration are known. The simulation result, the ability to reduce vibration is most effective by using a square elastomeric rubber when the elastomeric rubber is placed at a distance of 12 cm. The percentage of reduced vibration for the box elastomer placed in the position of $a = 12$ cm is 60.66%. The greatest ability to reduce vibration is 51.5% by using a cylindrical elastomer placed in position $a = 4$ cm on eksperiment result

Keywords: Wind Turbine, Elastomeric Rubber, Vibration Absorber.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukurdihaturkankehadirat Allah SubhanallahuWaTa'ala, hanyakarenatuntunan-Nya penulisdapat menyelesaikanTesisini.Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-2 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

PenyusunanTesis ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga, khususnya kedua orang tua dan adik-adik tersayang, Dewi, Ihsan, dan Letta, yang telah menjadi orang-orang terbaik dalam hidup penulis dan selalu memberikan doa dan dorongan dalam segala kondisi.
2. Dr.Eng. HarusLaksana Guntur, ST.M.Eng yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tesis
3. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, Dr. WiwiekHendrowati ST, MT dan Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. Selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tesis ini.
4. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS, terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
5. Sahabat-sahabat Penulis, Tantri, Ipeh, Amel, Fuguh, Aida, Mimi, Mas Achong, Mas Dika, yang sudah banyak membantu, memberikan masukan dan semangat kepada penulis.
6. Teman-teman DSM, Mas Yulianto, Edwin, Ferly, dan Ajeng yang senantiasa member motivasi dan menemani penulis selama kebersamaan dua tahun ini.
7. Rahulku, Ibrahim yang memberikan kekuatan, kasih sayang dan mampu mengembalikan semangat penulis.
8. Teman-teman Adventureiro, Dila, Rizqiana, Mas Aziz, Mas Dedi, Pak Edmundo, Pak Raimundo, dan Pak Abel atas kekeluargaannya selama ini.
9. Teman-teman Riset H.L.G, Cika, Aik, Dila, Imelda, Rozi, Syaldilas, Yoga, Cahyo, dan Boni yang senantiasa menemani dan memberikan semangat penulis.
10. Teman-teman yang pernah sekelas selama dua tahun ini Abdel, Rado, Pak Made Kastiawan, Pak Agung, Bu liza, Mas Fendi, Mas Fajar, Iqbal, Fatih, Agel, Bahdin, terima kasih untuk diskusi selama bersama.
11. Pak Dani, terima kasih telah bersedia membantu dalam pembuatan alat eksperimen penulis.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tesis ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis

bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Getaran pada Turbin Angin	5
2.1.1. Analisis Sumber Eksitasi untuk Getaran Aksial Sistem Menara-nacelle..	5
2.1.1.1 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Ketidakseimbangan Massa Pisau..	5
2.1.1.2 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Spoiler Tower Depan.	8
2.1.1.3 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Ketidakseimbangan Pneumatik....	9
2.1.2 Analisis Tiang dan Pondasi.	13
2.1.2.1 Pembebanan pada Tiang dan Pondasi.	13
2.1.2.1 Analisis Tiang.	16
2.1.2.2 Analisis Pondasi.	19
2.1.2.2 Analisis Frekuensi.	20
2.2 Peredam pada Bangunan dan Turbin Angin	21
2.3 Pengujian Karet	35

2.5 Isolator Getaran	39
2.6 Dynamic Vibration Absorber (DVA).....	43
2.7 Elastomer.....	44
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	49
3.1 Metode Penelitian.....	49
3.2 Tahap Studi Literatur	50
3.3 Pemodelan Sistem Dinamis dan Persamaan Gerak.....	51
3.4 Pembuatan Blok Simulink	57
3.5 Parameter.....	59
3.6 Pembuatan Model Eksperimen	60
3.7 Pengambilan data eksperimen.....	61
3.8 Analisa Grafik Respon Dinamis	63
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	65
4.1 Analisa Respon Simulasi pada Pondasi	65
4.2 Analisa Respon Eksperimen pada Pondasi	68
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen	70
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Target bauran energi sampai dengan 2050 (1).....	2
Gambar 2. 1 Diagram ketidak seimbangan massa pisau yang menghasilkan getaran (3).....	6
Gambar 2. 2 Grafik karakteristik frekuensi amplitudo getaran aksial yang diakibatkan massa pisau yang tidak stabil pada turbin angin (3)....	7
Gambar 2. 3 Model aksial getaran turbin angin sistem menara-nacelle (3).....	10
Gambar 2. 4 The mechanical network diagram for the axial vibration (3).....	12
Gambar 2. 5 Komponen gaya-gaya pada atas tiang dan pondasi (4).....	13
Gambar 2. 6 Gaya resultan gaya-gaya pada menara atas dan pondasi (4).....	14
Gambar 2. 7 asumsi pembebanan tiang (4).....	15
Gambar 2. 8 <i>Free body diagram</i> dari bagian tiang (4).	16
Gambar 2. 9 Lokasi titik kritis Adan B (4).	18
Gambar 2. 10 Konfigurasi regangan bangunan tinggi (5).....	21
Gambar 2. 11 (a) Respon waktu menggunakan TMD untuk tanah lunak (b) Respon waktu tanpa TMD untuk tanah lunak (5).	23
Gambar 2. 12 (a) Respon waktu tanpa TMD untuk tanah yang padat, (b) Respon waktu menggunakan TMD untuk tanah yang padat (5).	23
Gambar 2. 13 Bangunan bertingkat tanpa dan dengan isolasi pondasi (7).....	27
Gambar 2.14 (a) Desain pondasi (b) Skema ilustrasi dari pondasi (8).	30
Gambar 2.15 (a) Pemasangan isolator getaran pada pondasi bangunan (b) Isolator getaran (8).....	30
Gambar 2.16 Perbandingan pengukuran sebelum dan setelah pemasangan sistem isolasi getaran dan estimasi desain (8).	31
Gambar 2. 17 Pondasi bangunan sebelum dan sesudah diberi isolasi (9).....	32
Gambar 2. 18 Gambar nyata isolasi pondasi pada bangunan (9).....	32
Gambar 2.19 Ide dasar dari kontrol semi aktif pada turbin angin dengan peredam magnetorheological (10).....	33
Gambar 2.20 Percobaan turbin angin dengan isolator semi aktif (10).....	34
Gambar 2.21 Detail dari sistem pegas dan peredam magnetorheological (10).....	34

Gambar 2.22 (a) Grafik <i>base stress</i> terhadap waktu; (b) Grafik <i>top displacement</i> terhadap waktu dengan dan tanpa <i>isolator</i> getaran (10).....	35
Gambar 2. 23 Detail spesimen (11)	35
Gambar 2. 24 Preload Device (11).....	36
Gambar 2. 25 Perangkat eksperimen (11).....	36
Gambar 2. 26 kondisi setelah dilakukan pembebanan awal (11).....	37
Gambar 2. 27 Voigh Model (11).....	37
Gambar 2. 28 Skema <i>forced multi degree of freedom</i> getaran (12).	38
Gambar 2. 29 <i>Active vibration isolator</i> (13) (14).	40
Gambar 2. 30 <i>Passive vibration isolator</i> (15) (16).	40
Gambar 2. 31 Mesin dan komponen elastis pada pondasi rigid (a) sistem single dof ; (b) sistem massa-pegas-peredam (12).....	40
Gambar 2. 32 Variasi dari rasio transmisibilitas T_f dengan r (12).....	42
Gambar 2. 33 Variasi transmisibilitas perpindahan (T_d) dengan r (12).	43
Gambar 2. 34 Respon tanpa DVA dan dengan DVA (12).....	44
Gambar 2. 35 Elastomer berbentuk balok.....	44
Gambar 2. 36 Elastomer berbentuk silinder.....	45
Gambar 2. 37 Elastomer berbentuk taper.....	46
Gambar 3. 1 Diagram alir penulisan penelitian	50
Gambar 3. 2 Model fisik eksperimen penelitian	51
Gambar 3. 3 Penguraian gaya pada elastomer	52
Gambar 3. 4 Model dinamis sebelum diberikan elastomer.....	52
Gambar 3. 5 FBD sistem tanpa elastomer.....	52
Gambar 3. 6 Model dinamis eksperimen penelitian ketika telah diberikan elastomer	53
Gambar 3. 7 <i>Free body diagram</i> meja getar	54
Gambar 3. 8 <i>Free body diagram</i> tower dan pondasi.....	54
Gambar 3. 9 Gambar dinamis dari empat elastomer.....	56
Gambar 3. 10 Blok diagram penelitian	58
Gambar 3. 11 Gambar posisi peredam elastomer (a) $a=12$ cm (b) $a=4$ cm	59
Gambar 3. 12 Diagram alir pembuatan model eksperimen penelitian.....	60
Gambar 3. 13 Accelerometer	61

Gambar 3. 14 Peletakan Accelerometer	61
Gambar 3. 15 Power supply	62
Gambar 3. 16 Osciloscop	62
Gambar 3. 17 Alat uji eksperimen	62
Gambar 3. 18 Diagram alir pengambilan data eksperimen penelitian	63
Gambar 4. 1 Respon percepatan sebelum dipasang peredam elastomer	65
Gambar 4. 2 Grafik simulasi respon percepatan (1) translasi dan (2) sudut pada pondasi ketika (a) $a=4$ cm dan (b) $a=12$ cm.	66
Gambar 4. 3 Kemampuan meredam getaran pada simulasi	68
Gambar 4. 4 Grafik Eksperimen respon percepatan: (1) translasi, (2) angular, pada pondasi ketika: (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm.	68
Gambar 4. 5 Kemampuan Mereduksi Getaran Eksperimen.....	70

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Potensi energi fosil di Indonesia tahun 2015 (1).	1
Tabel 1. 2 Potensi energi baru terbarukan (2).	2
Tabel 2. 1 The impedance, admittance and logarithmic frequency characteristics of the three basic types of components (3).	11
Tabel 2. 2 Parameter Struktur Bangunan (5).	22
Tabel 2. 3 Parameter Struktur Tanah (5).	22
Tabel 2. 4 Getaran bangunan tinggi akibat gempa Tabas (5).	22
Tabel 2. 5 Getaran bangunan tinggi akibat gempa Kobe (5).	22
Tabel 2. 6 Perpindahan maksimum untuk zona seismik 5 pada tanah yang lunak maupun padat (6).	25
Tabel 2. 7 Beban axial untuk masing-masing kolom (6).	25
Tabel 2. 8 Parameter desain untuk bantalan keras dan lunak (6).	26
Tabel 2. 9 Dimensi bantalan (6).	26
Tabel 2. 10 Nilai sifat umum bangunan (6).	26
Tabel 2. 11 Parameter desain dari isolasi pondasi bangunan (7).	28
Tabel 2. 12 Karakteristik gerakan gempa (7).	28
Tabel 2. 13 Estimasi sifat material (11).	37
Tabel 2. 14 Parameter fisik (11).	37
Tabel 3. 1 Tabel Parameter	59
Tabel 3. 2 Material yang digunakan.	61
Tabel 4. 1 RMS percepatan simulasi pondasi	66
Tabel 4. 2 RMS percepatan angular simulasi pondasi	67
Tabel 4. 3 RMS ekeperimen respon pada pondasi	69
Tabel 4. 4 Perbandingan simulasi dan eksperimen RMS respon percepatan.	71
Tabel 4. 5 Perbandingan simulasi dan eksperimen RMS respon percepatan angular	71

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

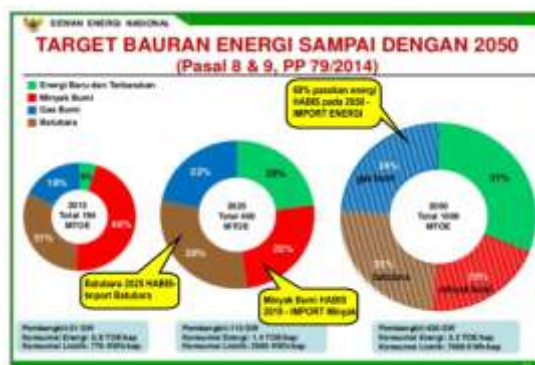
1.1 Latar Belakang

Sumber energi yang dibutuhkan di dunia sebagian besar berasal dari fosil, terutama sumber energi yang dapat menghasilkan energi listrik. Energi fosil yang kerap digunakan adalah minyak bumi, gas bumi, dan batubara. Produksi sumber energi fosil semakin lama semakin menurun dan kebutuhan energi yang semakin lama semakin meningkat. Di Indonesia, menurut data tahun 2015 (1), energi fosil semakin lama semakin habis jika tidak ada temuan cadangan baru.

Tabel 1. 1 Potensi energi fosil di Indonesia tahun 2015 (1).

No.	Jenis Energi	Sumber Daya	Cadangan	Produksi	Umur (asumsi: jika tidak ditemukan cadangan baru)
1.	Minyak Bumi	151 Miliar Barel	3,6 Miliar Barel	288 juta barel	12 tahun
2.	Gas Bumi	487 TCF	98,0 TCF	3,0 TSCF	33 tahun
3.	Batubara	120,5Miliar ton	32,4 Miliar ton	393 juta ton	82 tahun
4.	CBM	453 TSCF	-	-	-
5.	Shale Gas	574TSCF	-	-	-

Jika dengan kondisi potensi energi fosil seperti Tabel 1.1, pemerintah perlu membuat beberapa prioritas pembangunan energi nasional guna mewujudkan target bauran energi hingga tahun 2050. Gambar 1.1 menunjukkan target bauran energi pemerintah tahun 2015, 2025, dan 2050.



Gambar 1. 1 Target bauran energi sampai dengan 2050 (1).

Salah satu prioritas pembangunan energi nasional adalah memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan. Tabel 1.2 menunjukkan potensi energi terbarukan yang ada di Indonesia.

Tabel 1. 2 Potensi energi baru terbarukan (2).

No.	Tipe	Sumber Daya	Kapasitas Terpasang (MW)	Ratio (persen)
1.	Hidro	75.000 MW	5.940.000	7,92
2.	Panas Bumi	29.164 MW	1.341,00	4,60
3.	Biomassa	49.810 MW	1.644,10	3,30
4.	Energi Matahari	4,80 kWh/m ² /hari	22,45	-
5.	Energi Angin	3-6 m/s	1,87	-
6.	Laut	49 GW	0,01	0
7.	Uranium	3.000MW	30,00	0

Angin merupakan salah contoh sumber energi terbarukan. Kecepatan angin di Indonesia sekitar 3-6 m/s. Angin dapat menggerakkan turbin. Turbin adalah suatu mesin rotari yang berfungsi untuk mengubah energi dari fluida menjadi energi gerak yang bermanfaat. Salah satu jenis turbin adalah turbin angin. Prinsip kerja turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, kemudian putaran kincir inilah yang digunakan untuk menggerakkan generator yang menghasilkan listrik. Jika pembangkit listrik menggunakan turbin angin dikembangkan terus menerus maka krisis energi dapat diatasi.

Angin dapat digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik. Untuk meningkatkan performa turbin angin, kerusakan-kerusakan pada turbin angin perlu diminimalisir. Kerusakan pada turbin angin biasanya terjadi pada pondasi yang diakibatkan oleh momen. Hal ini yang menyebabkan terjadinya getaran pada turbin angin. Salah satu cara untuk mengurangi respon dinamis rotasional dari getaran turbin angin adalah dengan menambahkan kontrol pasif getaran yang berupa elastomer yang diletakkan di bawah pondasi turbin angin. Biasanya elastomer digunakan sebagai pereduksi getaran pada bangunan.

Pada penelitian ini, elastomer digunakan sebagai pereduksi getaran pada pondasi turbin angin yang divariasikan bentuk dan jaraknya. Sehingga nantinya dapat diaplikasikan sebagai peredam turbin angin secara sebenarnya dengan membandingkan rasio kekakuan elastomer skala lab dengan elastomer sebenarnya. Biasanya elastomer digunakan sebagai isolator pada pondasi bangunan. Pada penelitian ini, elastomer digunakan sebagai isolator pada pondasi turbin angin. Tiga variasi bentuk elastomer yang dibandingkan, silinder ($D=20$ mm, $t=25$ mm) dan taper ($D=20$ mm, $d=15$ mm, $t=25$ mm) dengan masing-masing variasi berjumlah 4 buah elastomer. Selain itu penelitian ini membandingkan variasi posisi elastomer (a) adalah 40 mm dan 120 mm. Turbin angin yang digunakan dalam penelitian ini yang mempunyai profil tiang lurus dengan diameter 10mm dan panjang 1000mm dan pondasi berbentuk balok dengan ukuran 260mmx260mmx17.5mm.

Dengan dilakukannya penelitian ini, dapat diketahui perbedaan respon dinamis dari masing-masing variasi elastomer pada masing-masing variasi posisi. Setelah mengetahui respon dinamis dari masing-masing variasi dapat diketahui variasi bentuk dan jarak mana yang mempunyai kemampuan mereduksi getaran yang paling baik. Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi dan eksperimen yang saling berkaitan. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian eksperimen dan divalidasi oleh perangkat lunak.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pemberian dan letak posisi elastomer terhadap respon dinamis yang turbin angin?
2. Manakah posisi elastomer yang tepat untuk mereduksi getaran?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pemberian dan letak posisi elastomer terhadap respon dinamis yang turbin angin?
2. Mengetahui posisi elastomer yang tepat untuk mereduksi getaran?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak ada defleksi ke arah vertikal karena jarang sekali kerusakan turbin angin ke arah vertikal.
2. *Nacelle*, tiang, dan pondasi dianggap rigid agar dapat diamati gerakan elastomernya.
3. Parameter yang digunakan adalah parameter model skala laboratorium.
4. Turbin angin yang dibahas adalah turbin angin residensial.
5. Inputan gaya berasal dari table shaker dengan frekuensi 8 Hz.
6. Analisa getaran difokuskan pada pondasi turbin, khususnya pada peredam elastomer.
7. Material yang digunakan tertentu yang terdapat pada bab 3.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai syarat kelulusan program Pascasarjana dan agar dapat dijadikan dasar dalam merancang elastomer turbin angin skala prototipe maupun sebenarnya.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Getaran pada Turbin Angin

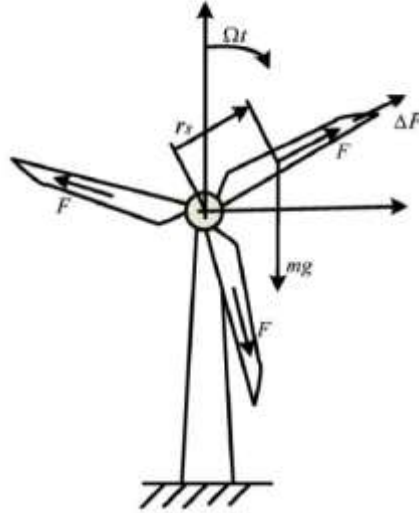
2.1.1. Analisis Sumber Eksitasi untuk Getaran Aksial Sistem Menara-nacelle

Saat ini turbin angin telah menarik perhatian luas di seluruh dunia karena biaya rendah. Dengan peningkatan kapasitas terpasang, masalah stabilitas sistem juga semakin menarik perhatian. Karena bentuknya yang ramping dan besarnya massa nacelle, struktur turbin angin dapat menghasilkan getaran dengan mudah. Selain itu, ada beberapa faktor juga dapat menghasilkan getaran pada sistem turbin angin, seperti beban berkala yang disebabkan dari putaran pisau, beban angin, proses penggantian, dan proses kontrol. Getaran turbin angin dapat merusak bearing, roda gigi, kopling, pisau, menara, dan komponen lainnya yang akan mengurangi keandalan keseluruhan bahkan umur penggunaan sistem. Oleh karena itu, Dong Xiaohui membahas teoritis dasar untuk desain dan kontrol stabilitas turbin angin (3).

Gaya eksitasi yang terjadi pada turbin terdiri dari Gaya eksitasi yang dihasilkan oleh ketidakseimbangan massa pisau, gaya eksitasi yang dihasilkan oleh spoiler tower depan, dan gaya eksitasi yang dihasilkan oleh ketidakseimbangan pneumatik.

2.1.1.1 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Ketidakseimbangan Massa Pisau.

Karena rotasi, berat pisau berubah terus-menerus relatif terhadap arah pisau. Jadi, gaya sentrifugal akan menghasilkan beban tarik yang *steady-state* pada pisau yang berputar. Sebagai contoh, gaya sentrifugal F dari ketiganya pisau seimbang dengan satu sama lain ketika rotor berputar. Namun, jika massa salah satu pisau berbeda dari dua bilah lainnya menghasilkan massa tambahan gaya eksitasi 1 kali frekuensi.



Gambar 2. 1 Diagram ketidak seimbangan massa pisau yang menghasilkan getaran (3).

Pada Gambar 2.1, F adalah gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh rotasi rotor yang mempunyai nilai:

$$F = mr_s \Omega^2 \quad (2. 1)$$

Dimana m adalah massa pisau dan Ω adalah rotasi rata-rata dari rotor.

Ketika masa salah satu pisau Δm lebih besar dari massa 2 pisau yang lainnya, gaya eksitasi 1kali frekuensi yang dihasilkan dari penambahan massa adalah:

$$\Delta F = \Delta m r_s \Omega^2 \quad (2. 2)$$

Komponen dalam arah horizontal $F_x(t)$ dan akan memicu getaran lateral dari sistem tiang-*nacelle* sebesar:

$$F_x(t) = \Delta m r_s \Omega^2 \sin \Omega t \quad (2. 3)$$

Berdasarkan rumusan 2.3, respon getaran aksial dari turbin angin dapat ditulis sebagai berikut:

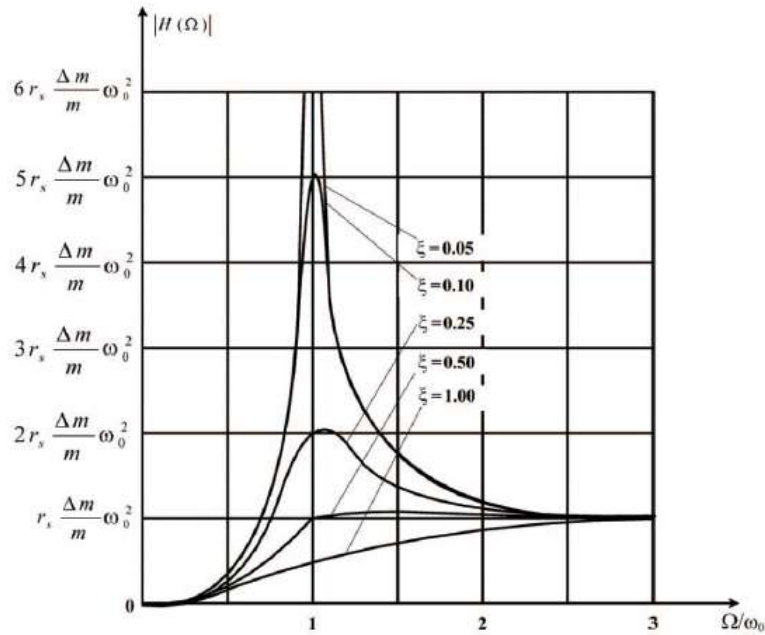
$$x(t) = H_D(\Omega)F_x(t)$$

$$x(t) = \frac{\Delta m r_s}{m} \omega_0^2 \frac{\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \sin \left[\Omega t - \tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\Omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2} \right] \quad (2.4)$$

Dengan amplitudo:

$$|H(\Omega)| = \frac{\Delta m r_s}{m} \omega_0^2 \frac{\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (2.5)$$

Karakteristik amplitudo frekuensi pada getaran aksial yang disebabkan massa tidak stabil pada pisaudapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 2. 2 Grafik karakteristik frekuensi amplitudo getaran aksial yang diakibatkan massa pisau yang tidak stabil pada turbin angin (3).

- Jika $\Omega=0$, $|H(0)| = 0$, menunjukkan amplitudo frekuensi rendah eksitasi mendekati 0. Pada keadaan ini, efek dinamis sangat kecil, sehingga getaran paksa pada proses dinamis dapat kurang lebih digambarkan oleh proses statis. Jadi, karakteristik dari sistem vibrasi tergantung pada komponen elastis pada bagian ini. Karakteristik sistem vibrasi juga konsisten terhadap kerja aktual turbin angin.
- Jika Ω tinggi, Ω/ω_n , $|H(\Omega)|$ mendekati nilai konstan $\frac{\Delta m r_s}{m} \omega_0^2$ menunjukkan bahwa ketika kecepatan rotor tinggi, sistem tidak memiliki waktu yang cukup untuk merespon eksitasi frekuensi tinggi akibat efek inersia. Karakteristik getaran tergantung pada efek sendi dari komponen elastis dan komponen massa.
- Jika Ω mendekati ω_0 , kurva $|H(\Omega)|$ menunjukkan nilai puncak, menunjukkan efek dinamika yang signifikan pada titik waktu ini. Kurva $|H(\Omega)|$ sangat bervariasi dalam rentang frekuensi ini untuk nilai damping rate ξ yang berbeda. Jika ξ besar, nilai puncak $|H(\Omega)|$ kecil, dan sebaliknya. Dengan demikian, karakteristik dari sistem getaran pada kali ini tergantung pada komponen redaman.
- Memperoleh turunan dari persamaan 2.5 lebih Ω dan Ω diset 0, nilai maksimum $|H(\Omega)|$ dapat diperoleh:

$$\Omega_r = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.6)$$

Hubungan antara frekuensi resonansi Ω , frekuensi natural dengan redaman ω_d dan natural frekuensi tanpa redaman ω_0 adalah $\Omega > \omega_0 > \omega_d$.

2.1.1.2 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Spoiler Tower Depan.

Spoiler depan menara dapat menghasilkan gangguan yang kuat ke pisau melawan arah angin dan sistem menara-*nacelle*. Untuk sistem menara-*nacelle* tiga pisau, kekuatan akan dihasilkan ketika masing-masing pisau berputar melalui menara. Rotor akan menghasilkan getaran yang melibatkan 3, 6, bahkan 9 kali

frekuensi komponen dalam setiap putaran rotasi. Amplitudo dilemahkan dengan peningkatan susunan sehingga persamaan untuk getaran aksial turbin angin dapat ditulis sebagai berikut:

$$F(t) = F_0 + \hat{F}_{1n} \cos(3\Omega t) + \hat{F}_{2n} \cos(3\Omega t) + \hat{F}_{3n} \cos(3\Omega t) + \dots \dots \quad (2.7)$$

Dimana F_0 adalah gaya dorong rata-rata.

Pengaturan perpindahan aksial dari turbin angin sebagai $X(t)$, gaya eksitasi spoiler depan dapat dihitung dari Persamaan (2.7). Menurut definisi perpindahan masuk, respon getaran aksial turbin angin adalah:

$$X(t) = A_0 + \sum_{b=1}^{\infty} \frac{A_{1b}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{3b\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(6\xi b \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \cos\left(3k\Omega t - \tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\Omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}\right) \quad (2.8)$$

Titik maksimum setiap urutan amplitudo adalah:

$$\Omega_{kr} = \frac{\omega_0}{3b} \sqrt{2\xi^2 - 1} \quad (2.9)$$

Hubungan antara frekuensi resonansi Ω , frekuensi natural dengan redaman ω_d dan natural frekuensi tanpa redaman ω_0 adalah $\Omega_{kr} > \frac{\omega_d}{3b} > \frac{\omega_0}{3b}$.

2.1.1.3 Gaya Eksitasi yang Dihasilkan oleh Ketidakseimbangan Pneumatik.

Kedua proses manufaktur dan instalasi dapat menyebabkan penyimpangan dalam sudut pemecah dan menghasilkan ketidakseimbangan pneumatik, yang akan menghasilkan getaran terutama melibatkan 1 kali komponen frekuensi dalam aksial dan arah lateral dari sistem tower-nacelle. Eksitasi kekuatan dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_1(t) = F_0 + \hat{F} \cos(\Omega t) \quad (2.10)$$

Pengaturan perpindahan aksial dari turbin angin sebagai $x(t)$, gaya eksitasi dari ketidakseimbangan pneumatik dapat dihitung dari Persamaan (2.10). Menurut definisi dari perpindahan masuk, getaran aksial respon dari turbin angin adalah:

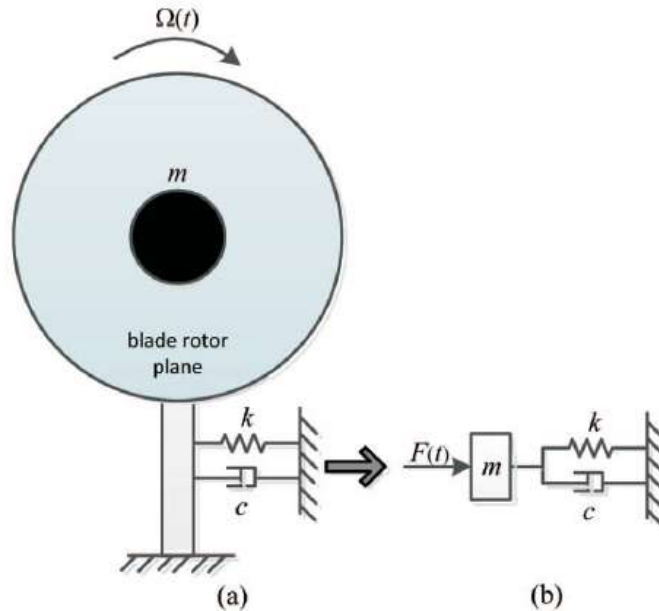
$$X(t) = A_0 + \frac{A_1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi b \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \cos\left(3k\Omega t - \tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\Omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}\right) \quad (2.11)$$

Titik maksimum setiap urutan amplitudo adalah:

$$\Omega_r = \omega_0 \sqrt{2\xi^2 - 1} \quad (2.12)$$

Hubungan antara frekuensi resonansi Ω , frekuensi natural dengan redaman ω_d dan natural frekuensi tanpa redaman ω_0 adalah $\Omega_r > \omega_d > \omega_0$.

Model getaran aksial turbin angin sistem tower-nacelle adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Model aksial getaran turbin angin sistem menara-nacelle (3).

Impedansi mekanik adalah rasio antara kompleks amplitudo gaya eksitasi dan respon amplitudo kompleks. pengesetan gaya eksitasi pada sistem sebagai:

$$f(t) = |F|e^{i(\omega t + \alpha)} = F e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

Dimana $F = |F|e^{1\alpha}$, respon perpindahan *steady-state*nya adalah:

$$x(t) = |X|e^{i(\omega t + \beta)} = X e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

Dimana $X = |X|e^{1\alpha}$, impedansi perpindahan adalah:

$$Z_D = \frac{|F|e^{i(\omega t + \alpha)}}{|X|e^{i(\omega t + \beta)}} = \frac{|F|}{|X|} e^{i(\alpha - \beta)} = \frac{F}{X} \quad (2.15)$$

Perpindahan masuknya:

$$H_D = \frac{1}{Z_D} = \frac{X}{F} \quad (2.16)$$

Impedansi perpindahan mencerminkan dinamika kekakuan sistem, sementara perpindahan masuk mencerminkan fleksibilitas dinamis dari suatu sistem. Sebuah sistem getaran terdiri dari tiga jenis komponen: pegas, peredam dan blok massa. Hasil perhitungan impedansi dan admittance ditunjukkan pada tabel berikut.

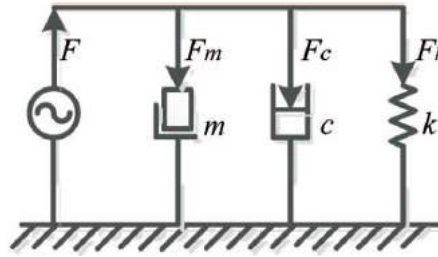
Tabel 2. 1 The impedance, admittance and logarithmic frequency characteristics of the three basic types of components (3).

Components	Impedance Z_D	Admittance H_D	Impedance logarithmic frequency characteristics		Admittance logarithmic frequency characteristics	
			Amplitude $\log Z_D $	Argument ϕ	Amplitude $\log H_D $	Argument ϕ
Spring	k	$1/k$	$\log k$	0°	$-\log k$	0°
Damper	$i\omega c$	$1/i\omega c$	$\log \omega + \log c$	90°	$-\log \omega - \log c$	-90°
Mass block	$-\omega^2 m$	$-1/(\omega^2 m)$	$-2\log \omega - \log m$	-90°	$2\log \omega + \log m$	90°

Sistem tower-nacelle dapat disederhanakan menjadi satu tingkat kebebasan sistem getaran dengan asumsi: baling-baling kaku, rotor merupakan disk tanpa bobot, massa rotor dan nacelle berkonsentrasi di tengah piringan, menara elastis di arah transversal dan hanya getaran aksial yang dipertimbangkan. Kemudian, model getaran ditunjukkan pada gambar 2.3 (a) dan gambar 2.3 (b).

Dalam Gambar 2.3, m adalah massa total nacelle dan pisau, c adalah pneumatik aksial dan redaman struktural dari turbin angin dalam keadaan normal, k adalah kekakuan dari menara, Ω adalah tingkat rotasi rotor, $F(t)$ adalah gaya dorong.

Gaya yang dikenakan pada sistem diserap oleh tiga komponen pada saat yang sama, jadi aliran kekuatannya dibagi menjadi tiga bagian. Kecepatan tiga komponen adalah sama, sementara massa dianggap *diground*. Oleh karena itu, sistem paralel diperoleh dan diagram mekanis jaringan digambar sebagai berikut:



Gambar 2. 4 The mechanical network diagram for the axial vibration (3).

Karena sistem getaran aksial adalah sistem paralel, impedansi mekanik dari keseluruhan sistem adalah penjumlahan impedansi mekanik dari ketiga komponen tersebut. Dengan demikian, impedansi perpindahan dari sistem dapat ditulis sebagai berikut.

$$|Z_D| = \omega \sqrt{c^2 + \left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)^2} \quad (2.17)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{c}{\frac{k}{\omega} - \omega m} \quad (2.18)$$

Amplitudo dan argumen perpindahan masuk adalah:

$$|H_D| = \frac{1}{\omega \sqrt{c^2 + \left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)^2}} \quad (2.19)$$

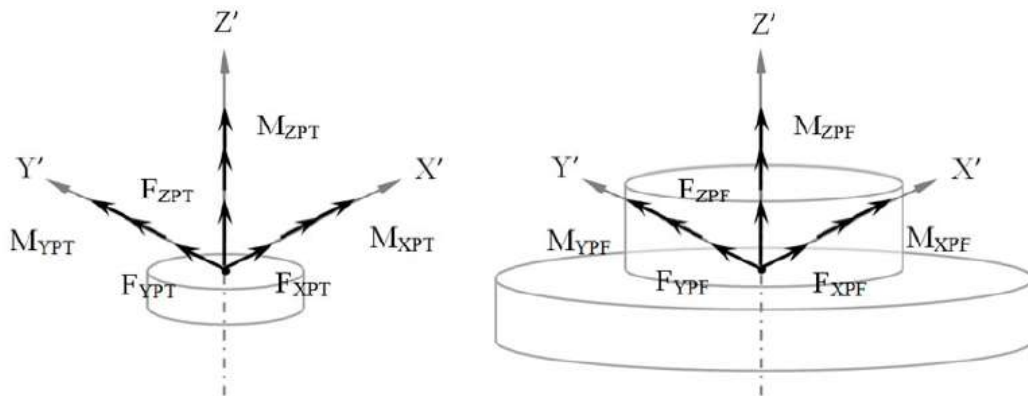
$$\varphi = -\tan^{-1} \frac{c}{\frac{k}{\omega} - \omega m} \quad (2.20)$$

2.1.2 Analisis Tiang dan Pondasi.

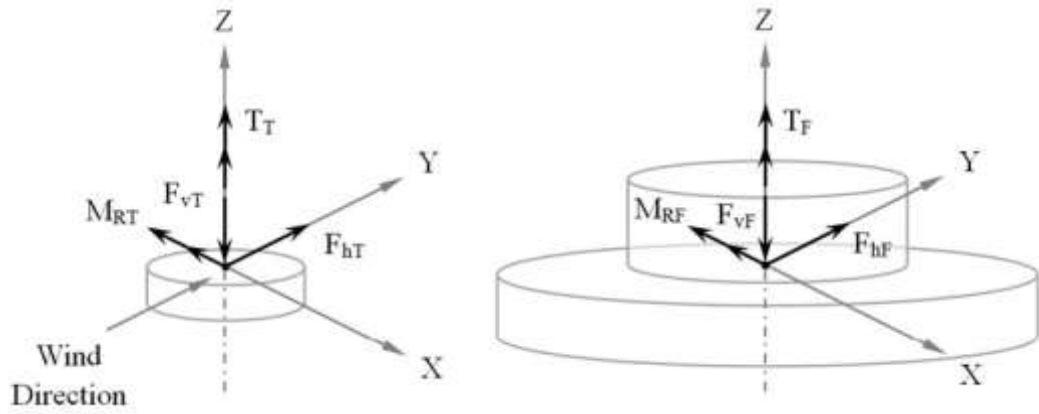
2.1.2.1 Pembebanan pada Tiang dan Pondasi.

Beban tower meliputi turbin, angin, berat tiang, dan kelengkapan internal. Beban dari turbin, yang bekerja di puncak menara, diperoleh dari beban struktural yang disediakan oleh produsen turbin. Angin, berat tiang, dan perlengkapan internal beban diperoleh dengan menggunakan rumus yang tepat. Beban di atas pondasi, yang hasilnya dari berbagai beban di menara, diperoleh dari beban struktural. Penambahan beban pada pondasi termasuk beratnya sendiri (4).

Komponen gaya pada atas tiang dan pondasi dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2. 5 Komponen gaya-gaya pada atas tiang dan pondasi (4).



Gambar 2. 6 Gaya resultan gaya-gaya pada menara atas dan pondasi (4).

Gaya resultan yang berperan pada tiang atas adalah:

$$F_{hT} = \sqrt{F_{XPT}^2 + F_{YPT}^2} \quad (2.21)$$

$$F_{VT} = -F_{ZPT} \quad (2.22)$$

$$M_{RT} = \sqrt{M_{XPT}^2 + M_{YPT}^2} \quad (2.23)$$

$$T_T = M_{ZPT} \quad (2.24)$$

Sedangkan gaya resultan yang berperan pada pondasi adalah:

$$F_{hF} = \sqrt{F_{XPF}^2 + F_{YPF}^2} \quad (2.25)$$

$$F_{VF} = -F_{ZPF} \quad (2.26)$$

$$M_{RF} = \sqrt{M_{XPF}^2 + M_{YPF}^2} \quad (2.27)$$

$$T_F = M_{ZPF} \quad (2.28)$$

Selain beban atas menara, gaya karena angin, berat diri, dan perlengkapan internal harus dipertimbangkan dalam analisis menara. Beban didistribusikan horisontal karena angin:

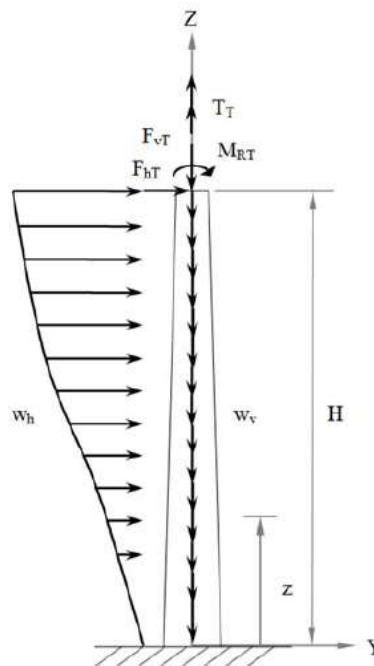
$$w_h = c_f q_i DAF d_e(z) \quad (2.29)$$

dimana c_f adalah koefisien gaya *drag*, q_i adalah tekanan angin ketika ketinggian z , DAF adalah faktor pengerasan dinamis, dan $d_e(z)$ adalah diameter bagian luar ketika ketinggian z .

Distribusi beban merata vertikal disebabkan berat tiang itu sendiri dan peralatan internal:

$$w_v = w_{IF} + A(z)\gamma \quad (2.30)$$

dimana w_{IF} adalah distribusi beban yang disebabkan oleh peralatan internal, $A(z)$ adalah luasan penampang pada saat ketinggian z , dan γ adalah berat spesifik dari material tiang.



Gambar 2. 7 asumsi pembebanan tiang (4).

Selain beban dari beban struktural, gaya karena berat pondasi itu sendiri harus dipertimbangkan dalam analisis pondasi. Berat dari pondasi sendiri bertindak di pusat gravitasinya dalam arah Z negatif.

Beban vertikal karena berat pondasi dapat dihitung:

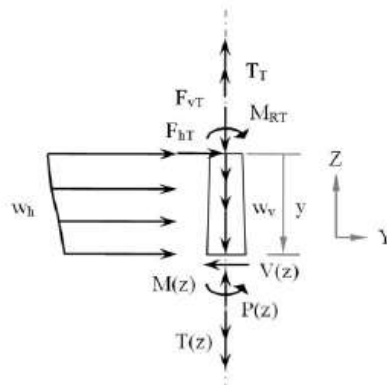
$$W_f = m_f g \quad (2.31)$$

dimana m_f adalah massa pondasi dan g adalah konstanta gravitasi.

2.1.2.1 Analisis Tiang.

Analisis menara terdiri dari menghitung gaya internal, defleksi, momen orde kedua akibat defleksi, komponen tegangan, dan tegangan utama. Komponen tegangan dan tegangan utama yang sesuai diperoleh pada titik-titik kritis dan tegangan utama maksimum diambil sebagai desain tegangan.

FBD dari gaya internal dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 8 *Free body diagram* dari bagian tiang (4).

Gaya internal sebagai fungsi dari ketinggian z :

$$P(z) = F_{VT} - \int_0^{H-z} w_v dy \quad (2.32)$$

$$V(z) = F_{hT} - \int_0^{H-z} w_h dy \quad (2.33)$$

$$T(z) = T_T \quad (2.34)$$

$$M(z) = M_{RT} + F_{hT}(H - z) + \int_0^{H-z} w_h(H - z - y)dy + M(z)_{2nd\ order} \quad (2.35)$$

Momen orde kedua dapat dihitung dengan menggunakan:

$$M(z)_{2nd\ order} = P(z) \times 0,75 \times (v_{top} - v_i) \quad (2.36)$$

dimana v_i adalah defleksi pada bagian i^{th} dan v_{top} adalah defleksi dari menara atas.

Defleksi ditentukan dengan menerapkan prosedur integrasi numerik, yang menggunakan aturan trapezoidal, pada persamaan garis diferensial elastis dua kali. Penting untuk dicatat bahwa persamaan ini mengasumsikan perilaku elastis secara linear dari struktur.

$$EI(z)v''(z) = -M(z)$$

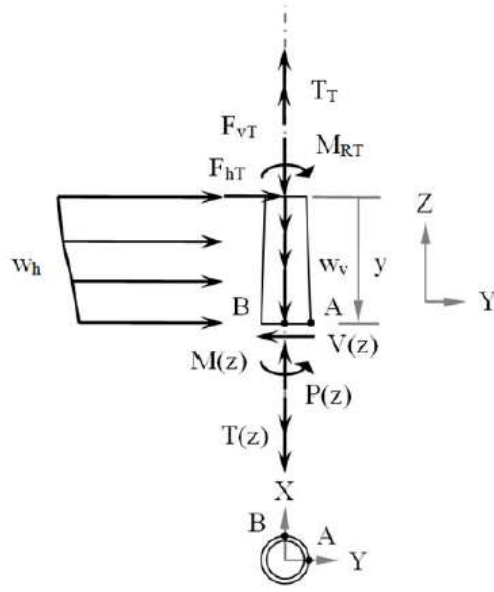
$$v_i'' = -\frac{M(z_i)}{EI(z_i)} \quad (2.37)$$

$$v_i' = v_{i-1}' + \frac{v_i' + v_{i-1}'}{2}h \quad (2.38)$$

$$v_i = v_{i-1} + \frac{v_i' + v_{i-1}'}{2}h \quad (2.39)$$

dimana E adalah modulus young, I(z) adalah inersia luas penampang momen pada ketinggian z dan $h = z_i - z_{i-1}$.

Ketika gaya-gaya internal yang bekerja pada tiang diketahui, komponen tegangan-tegangan internal padadua titik kritis dapat dihitung. Tegangan prinsipal maksimum diambil sebagai tegangan desain.



Gambar 2. 9 Lokasi titik kritis Adan B (4).

Kompenan tegangan internal pada titik kritis A:

$$\sigma_Z = \frac{P(z)}{A(z)} + \frac{M(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{I(z)} \quad (2.40)$$

$$\sigma_{ZX} = \frac{T(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{J(z)} \quad (2.41)$$

Kompenan tegangan internal pada titik kritis A:

$$\sigma_Z = \frac{P(z)}{A(z)} \quad (2.42)$$

$$\sigma_{ZY} = \frac{T(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{J(z)} + \frac{V(z) Q(z)}{I(z) b(z)} \quad (2.43)$$

Dimana $A(z)$ luas penampang melintang pada ketinggian z , $d_e(z)$ adalah diameter luar tiang pada ketinggian z , $J(z)$ adalah momen inersia polar pada ketinggian z , $Q(z)$ adalah momen pertama pada ketinggian z , dan $b(z)$ adalah lebar penampang melintang pada ketinggian z .

Tegangan-tegangan prinsipal ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). pada titik kritis A dan B adalah eigenvalue (σ_p) dari tensor tegangan yang dapat diketahui dengan menyelesaikan persamaan karakteristik pada masing-masing titik.

$$\begin{bmatrix} \sigma_X - \sigma_p & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_Y - \sigma_p & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_Z - \sigma_p \end{bmatrix} = 0 \quad (2.44)$$

Dimana $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

2.1.2.2 Analisis Pondasi.

Analisis pondasi terdiri dari menghitung beban total vertikal, beban maksimum pada tanah, nilai kekakuan pondasi, momen guling dan menahan pondasi. Beban vertikal total:

$$Q = F_{vF} + W_f \quad (2.45)$$

Tekanan maksimum padatanah untuk pondasi berbeban esentrik:

$$q_{maks} = \begin{cases} \frac{Q}{BL} \left(1 + \frac{6e}{B} \right), & e < \frac{B}{6} \\ \frac{4Q}{3L(B-2e)}, & e \geq \frac{B}{6} \end{cases} \quad (2.46)$$

$$e = \frac{M_{RF}}{Q} \quad (2.47)$$

Dimana B dan L diambil sebagai diameter pondasi sirkular.

Kekakuan pondasi tergantung dari sifat tanah, dimensi pondasi dan kedalaman lapisan tanah keras. Kekakuan pondasi terbagi dua, yaitu kekakuan rotasional dan horizontal. Kekakuan rotasional adalah rasio momen guling dan sudut rotasi. Kekakuan horizontal adalah rasio gaya horizontal dengan perpindahan horizontal. Kekakuan rotasional dan horizontal dapat dihitung dengan:

$$K_R = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H_b}\right) \left(1 + 2\frac{D_f}{R}\right) \left(1 + 0,7\frac{D_f}{H_b}\right) \quad (2. 48)$$

$$K_H = \frac{8GR^3}{1-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H_b}\right) \left(1 + \frac{2}{3}\frac{D_f}{R}\right) \left(1 + \frac{5}{4}\frac{D_f}{H_b}\right) \quad (2. 49)$$

Momen guling dan momen tahanan dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\Sigma M_R = Q \times \frac{B}{2} \quad (2. 50)$$

$$\Sigma M_O = F_{hF} \times (D_f + h_p) + M_{RF} \quad (2. 51)$$

Dimana D_f dan h_p adalah kedalaman dan tinggi pondasi.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{\bar{m}}} \quad (2. 52)$$

$$\bar{k} = g \sum_{i=1}^n m_i v_i \quad (2. 53)$$

$$\bar{m} = g \sum_{i=1}^n m_i v_i^2 \quad (2. 54)$$

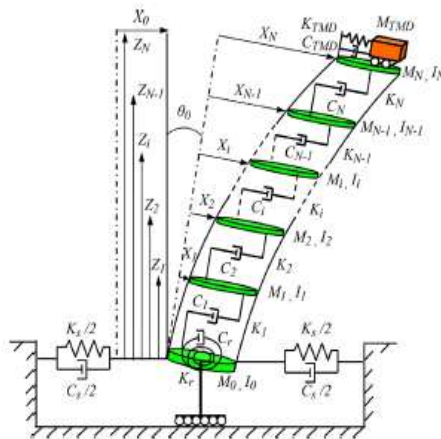
2.1.2.2 Analisis Frekuensi.

Frekuensi alami, f_n , menara dan sistem gabungan menara dan pondasi diperoleh dengan menggunakan metode massa setara yang berasal dari Metode Rayleigh. Metode ini mengasumsikan bahwa massa menara disatukan pada suatu titik seri dan defleksi di bawah pemuatan statis dekat dengan mode bentuk dasar. Metode ini diimplementasikan dengan menghitung kekakuan efektif dan massa efektif nilai.

2.2 Peredam pada Bangunan dan Turbin Angin

Penelitian tentang peredam pada bangunan sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pada tahun 2011, Anooshiravan Farshidianfar dan Saeed Soheili melakukan penelitian mengenai pengoptimalan TMD (*Tuned Mass Damper*) untuk osilasi gempa bumi pada bangunan tinggi yang mempertimbangkan efek struktur tanah (5). Gempa bumi yang dianalisa adalah gempa bumi terjadi di Tabas (Iran) sebesar 7.7 skala richter dan Kobe (Jepang) sebesar 6.7 skala richter.

Penelitian ini mempunyai tujuan untuk mengurangi nilai perpindahan maksimum dan percepatan di tiap lantai bangunan karena gempa bumi dengan masing-masing kondisi permukaan tanah. Untuk struktur tanah yang digunakan adalah tanah lunak, sedang, dan padat.



Gambar 2. 10 Konfigurasi regangan bangunan tinggi (5).

Gambar di atas menunjukkan bangunan dengan banyak lantai yang massa setiap lantai dinotasikan M_i dan momen inersianya I_i . Sedangkan, untuk massa dan momen inersia pondasi M_0 dan I_0 . Konstanta pegas dan peredam antara lantai dinotasikan K_i dan C_i . Sedangkan, untuk parameter massa, konstanta pegas, dan peredam dari TMD dinotasikan M_{TMD} , K_{TMD} , dan C_{TMD} . Peredam dari swaying and rocking dashpots dinotasikan dengan C_s dan C_r . Sedangkan, konstanta pegasnya dinotasikan K_s dan K_r .

Parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Parameter Struktur Bangunan (5).

No. of stories	40
Story height (Z_i)	4 m
Story mass (M_i)	9.8×10^5 kg
Story moment of inertia (I_i)	1.31×10^8 kgm ²
Story stiffness (K_i)	$K_1 = 2.13 \times 10^9$ N/m $K_{40} = 9.98 \times 10^8$ N/m $K_{40} \ll K_1 \ll K_i$
Foundation radius (R_0)	20 m
Foundation mass (M_0)	1.96×10^8 kg
Foundation moment of inertia (I_0)	1.96×10^8 kgm ²

Tabel 2. 3 Parameter Struktur Tanah (5)

Soil type	Swaying damping C_s (Ns/m)	Rocking damping C_r (Ns/m)	Swaying stiffness K_s (N/m)	Rocking stiffness K_r (N/m)
Soft soil	2.19×10^6	2.26×10^{10}	1.91×10^9	7.53×10^{11}
Medium soil	6.90×10^6	7.02×10^{10}	1.80×10^{10}	7.02×10^{12}
Dense soil	1.32×10^9	1.15×10^{11}	5.75×10^{10}	1.91×10^{13}

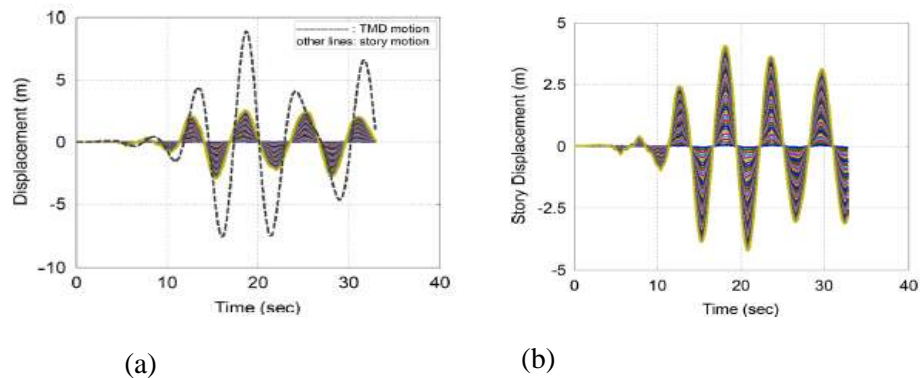
Tabel 2. 4 Getaran bangunan tinggi akibat gempa Tabas (5).

Soil type	Without TMD		With TMD		% Reduction		% Reduction for target function
	u_{max} (m)	\ddot{u}_{max} (m/s ²)	u_{max} (m)	\ddot{u}_{max} (m/s ²)	u_{max}	\ddot{u}_{max}	
Soft soil	4.2291	12.2094	2.9509	12.2714	30.23	0.51	23.34
Medium soil	2.6733	12.8245	1.6592	12.7974	37.93	0.21	25.70
Dense soil	2.2642	12.8148	1.4290	12.7798	36.88	0.27	23.65
Fixed base	2.0235	12.7756	1.4135	12.7507	30.14	0.19	18.54

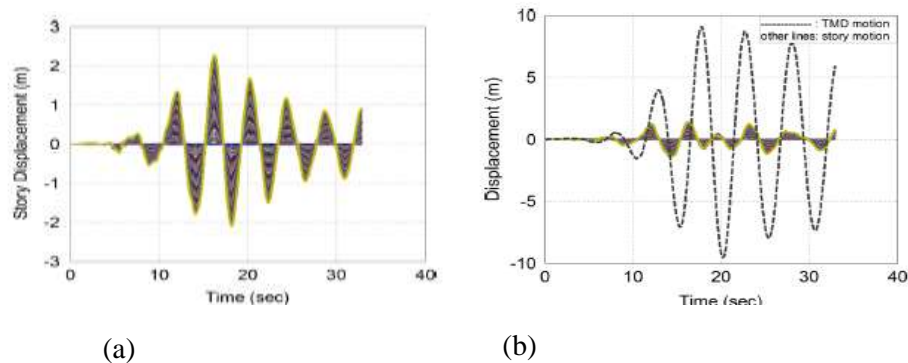
Tabel 2. 5 Getaran bangunan tinggi akibat gempa Kobe (5).

Soil type	Without TMD		With TMD		% Reduction		% Reduction for target function
	u_{max} (m)	\ddot{u}_{max} (m/s ²)	u_{max} (m)	\ddot{u}_{max} (m/s ²)	u_{max}	\ddot{u}_{max}	
Soft soil	0.7588	9.5493	0.6819	8.8428	10.13	7.40	8.61
Medium soil	1.0615	11.2907	0.8247	8.5901	22.31	23.92	23.14
Dense soil	1.0576	11.4019	0.8632	8.8109	18.38	22.72	20.63
Fixed base	1.0459	11.4408	0.9318	8.8322	10.90	22.8	17.12

Sedangkan hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 11 (a) Respon waktu menggunakan TMD untuk tanah lunak (b) Respon waktu tanpa TMD untuk tanah lunak (5).



Gambar 2. 12 (a) Respon waktu tanpa TMD untuk tanah yang padat, (b) Respon waktu menggunakan TMD untuk tanah yang padat (5).

Berdasarkan hasil grafik 2.12 dan 2.13 dapat disimpulkan bahwa karakteristik tanah dan penggunaan TMD mempengaruhi perpindahan di bangunan tinggi. Grafik 2.12 (a) menunjukkan bahwa penggunaan TMD untuk karakteristik *soft soil* akan mengurangi pergerakan bangunan saat terjadi gempa. Dengan kata lain, perpindahan terhadap waktu di bangunan tinggi menjadi tereduksi. Bila dibandingkan dengan grafik 2.12 (b) tanpa penggunaan TMD diperoleh perpindahan bangunan tinggi yang semakin meningkat saat diberikan gaya eksitasi lebih besar karena pergerakannya tidak diredam oleh TMD. Sedangkan, grafik 2.13 (b) menunjukkan adanya pereduksian perpindahan di bangunan tinggi terhadap waktu karena penggunaan TMD untuk karakteristik tanah padat. Pereduksian perpindahan ini terjadi akibat pergerakan bangunan tinggi saat

diberikan eksitasi mampu diredam energinya oleh TMD. Bila dibandingkan dengan grafik 2.13 (a) menjelaskan bahwa bangunan tinggi tanpa TMD akan diperoleh nilai perpindahan terhadap waktu yang lebih besar. Hal ini karena tidak ada peredaman yang dilakukan terhadap bangunan tinggi saat diberikan eksitasi. Berdasarkan grafik yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa sistem TMD sangat efektif dalam melakukan peredaman di bangunan tinggi saat terjadi eksitasi yang berupa gempa bumi. Pada bangunan tinggi yang menggunakan TMD meredam pergerakan lebih besar terjadi pada tanah yang mempunyai struktur padat daripada tanah yang mempunyai struktur halus.

Untuk peredam pada pondasi bangunan, K.A. Malek dan K.B. Basir melakukan penelitian isolasi pondasi bangunan dengan menggunakan bantalan karet alam pada tahun 2001 (6). Bantalan karet alam yang mempunyai redaman tinggi efektif dalam memberikan perlindungan struktur dari efek merusak gempa bumi. Ada banyak gedung di seluruh dunia yang dipasang pada bantalan karet dan bangunan-bangunan ini diperkirakan tidak rusak pada gempa bumi Kobe dan Northridge yang terjadi pada tahun 1995 dan 1994. Meskipun Semenanjung Malaysia pada umumnya dianggap mempunyai gerakan seismik yang stabil, negara bagian Sabah di bagian timur Malaysia pada kenyataannya tidak seperti itu. Pada bangunan berlantai beton bertulang 3 dipasang bantalan karet alam redaman tinggi yang dibangun di Sabah. Pada penelitian yang dilakukan K.A. Malek dan K.B. Basir menggambarkan desain sistem isolasi dan bantalan individu. Nilai sifat karet dan bantalan juga ditunjukkan pada penelitian ini

Untuk mendesain dimensi bantalan yang tepat, maksimal respon perpindahan struktur didapat dari studi gempa di Indonesia yang memberikan spektrum respon struktural sederhana dari enam zona seismik untuk periode kembali gempa 20, 200, dan 1000 tahun. Sabah jatuh di zona 5 dan menurut Studi, nilai perpindahan puncak untuk periode kembali yang berbeda ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. 6 Perpindahan maksimum untuk zona seismik 5 pada tanah yang lunak maupun padat (6).

Earthquake return period year	Displacement (5% damping) mm		Displacement (Corrected to 10% damping) mm	
	Hard	Soft	Hard	Soft
20	15	50	12.5	12
200	109	188	91	157
1000	227	317	218	304

Dari sudut pandang struktural, yang praktis dan mudah untuk digabungkan sistem isolasi adalah untuk menemukan satu bantalan di bawah setiap kolom beban-bantalan. Karena ada 28 kolom di gedung, ini menyebabkan 28 bantalan isolasi yang mendukung variasi beban yang signifikan yaitu dari 313kN hingga 1360kN. Rincian beban aksial pada setiap 28 kolom diberikan pada tabel 2.7. Parameter desain bantalan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pula pada tabel 2.8. Dimensi dari bantalan ditunjukkan pada tabel 2.9. Dan nilai sifat bangunan secara umum ditunjukkan pada tabel 2.10.

Tabel 2. 7 Beban axial untuk masing-masing kolom (6).

No	Axial Loads (kN)	No	Axial Loads (kN)	No	Axial Loads (kN)	No	Axial Loads (kN)
1	453	8	354	15	1,112	22	1,337
2	453	9	1,041	16	1,078	23	1,159
3	313	10	1,358	17	1,078	24	910
4	313	11	1,358	18	1,112	25	544
5	354	12	1,041	19	1,112	26	491
6	544	13	1,078	20	1,078	27	491
7	544	14	1,112	21	910	28	544
Total building weight 23,262 kN							

Tabel 2. 8 Parameter desain untuk bantalan keras dan lunak (6).

Type of bearings	Soft bearing	Hard bearing
Vertical design load (kN)	450	1120
Nominal shear stiffness (kN/mm)	0.58	1.0
Nominal vertical stiffness (kN/mm)	349	639
Nominal vertical natural frequency (Hz)	12.1	11.1
Safety factor	5.7	6.2
Critical load (kN)	2565	6944
Rollout instability (mm)	432	432
Maximum vertical load (kN)	544	1360
Maximum compressive stress (MPa)	3	7.5
Nominal compressive stress (MPa)	2.5	6.2

Tabel 2. 9 Dimensi bantalan (6).

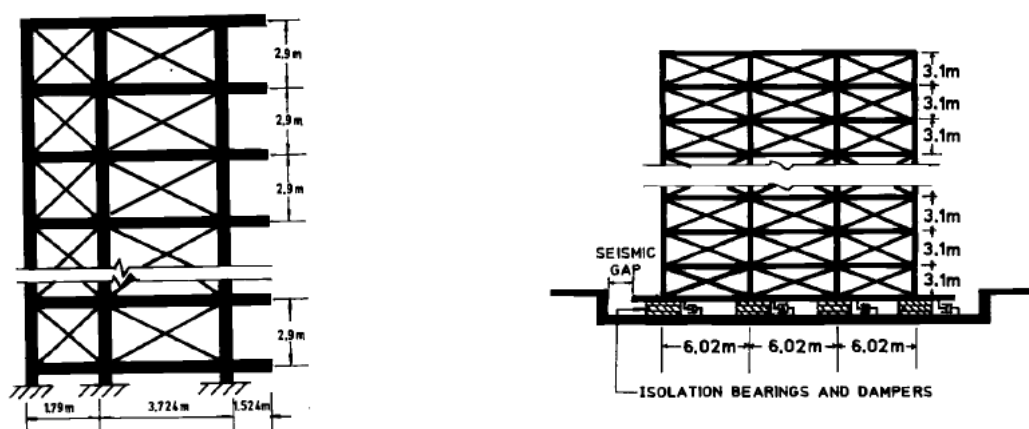
Soft bearing	Hard bearing
11 rubber layers; 11.35mm thick	12 rubber layers, 10.16mm thick
10 reinforcing plates; 3mm thick, 480mm diameter	11 reinforcing plates; 3mm thick, 480mm diameter
Rubber cover layer (side); 10mm thick	Rubber cover layer (side); 10mm thick
2 endplates; 20mm thick, 494mm diameter	2 endplates; 20mm thick, 494mm diameter
2 end cover layer; 2mm thick	2 end cover layer; 2mm thick
Overall dimensions; 199mm high, 500mm diameter	Overall dimensions; 199mm high, 500mm diameter

Tabel 2. 10 Nilai sifat umum bangunan (6).

Weight of the building	23,275 kN
Total number of bearings: 28	16 hard bearing and 12 soft bearings
Total vertical stiffness; $16 \times 639 \text{ kN/mm} + 12 \times 341 \text{ N/mm}$	14316 kN/mm
Building's vertical natural frequency	12.4 Hz
Total horizontal stiffness; $16 \times 1.0 \text{ kN/mm} + 12 \times 0.58 \text{ kN/mm}$	23.0 kN/mm
Building's horizontal natural frequency	0.5 Hz
Design force at 91mm deflection on the building	1046 kN
Maximum probable force on the building at 218mm deflection for the building	2507kN
Design force at 91mm deflection on the structure below the bearings	2093 kN
Maximum probable force at 218mm deflection below the bearings	5014 kN

Sebelum produksi sebenarnya dari 28 bearing, dua bantalan prototipe telah dibuat. Bantalan prototipe diuji dan berada dalam desain spesifikasi. Ikatan antara lapisan karet dan pelat logam juga diuji dan itu jauh di atas nilai minimum yang diperlukan. Dua bantalan diuji di bawah gabungan beban vertikal dan horizontal di 100% perpindahan geser (122 mm defleksi) tanpa kerusakan pada bantalan dan tidak terguling. Bahkan diperkirakan bahwa akan terguling pada 432 mm defleksi yang jauh di atas bahkan untuk kembalinya gempa 1000 tahun periode (218 mm). Pengujian tidak bisa dilakukan lebih tinggi dari defleksi 122 mm karena keterbatasan peralatan pengujian. Bantalannya dirancang untuk rusak secara horizontal hingga sekitar 200% jauh di atas pengembalian 1000 tahun periode. Nilai kekakuan geser yang diprediksi dari bearing adalah 0,58 kN/mm dan 1.0 kN/mm masing-masing untuk bantalan lunak dan keras. Nilai yang terukur untuk 28 bantalan rata-rata dalam 5% dari nilai yang diprediksi.

Pada tahun 2004, Sarvesh K. Jain dan Sashi K. Thakkar meneliti aplikasi pada isolasi pondasi untuk bangunan yang fleksibel yang terdiri dari beberapa tingkat (7). Pada penelitian ini dilakukan beberapa strategi. Pertama, menaikkan kekakuan superstruktur. Kedua, menaikkan redaman dari superstruktur. Dan ketiga, menaikkan fleksibilitas dari sistem isolasi. Bangunan yang dianalisa ini mempunyai periode waktu dasar antara 1 hingga 3 detik. Tiga bangunan yang mempunyai 10,14, dan 20 tingkat. Parameter desain dari isolasi pondasi pada bangunan dapat dilihat pada tabel 2.11.



Gambar 2. 13 Bangunan bertingkat tanpa dan dengan isolasi pondasi (7).

Tabel 2. 11 Parameter desain dari isolasi pondasi bangunan (7).

Parameter	Horizontal Stiffness of Bearing, K_h (kN/m)								Isolation Damping (%)
Bearing Category	I		II		III		IV		
Isolation period	2 sec	3 sec	2 sec	3 sec	2 sec	3 sec	2 sec	3 sec	
10 storey building	453	201	750	335	1100	492	1250	559	10.0
14 storey building	2088	928	3572	1587	5911	2627	--	--	10.0
20 storey building	2986	1327	5114	2273	8427	3745	--	--	10.0

Tiga bangunan 10 hingga 20 lantai dianalisis dalam penelitian ini. Bangunan-bangunan itu dipenuhi oleh tujuh karakteristik gerakan gempa nyata yang berbeda tetapi skala untuk percepatan tanah puncak sama 0,4 g. Gerakan gempa ini berada dikisaran 0,5 hingga 8,5 Hz. Karakteristik gerakan gempa dapat dilihat pada tabel 2.12.

Tabel 2. 12 Karakteristik gerakan gempa (7).

Earthquake Date	M	Station	Components	PGA (m/s ²)	Underlying Strata	Dominant frequencies
NE (India) Aug. 6, 1988	6.8	Berlongfer	S76W	2.95	Sandy soil	1.5 - 3.0 Hz
			N14W	3.37		
Uttarkashi Oct. 20, 1991	6.5	Uttarkashi	N15W	2.37	Rock	2.5 - 6.5 Hz
			N75E	3.04		
Imperial Valley May 18, 1940	6.3	El Centro	S00E	3.35	Alluvium	0.1-10.0 Hz
			S90W	2.10		
NE(India) Aug. 6, 1988	6.8	Silchar	N60E	0.63	Alluvium	0.5 – 2.5 Hz
			S30E	0.89		
Koyna Dec.12, 1967	6.5	Koyna dam	Longitudinal	6.19	Rock	2.5 – 8.5 Hz
			Transverse	4.22		
Taft July 21, 1952	7.7	Kern County	N21E	1.53	12m alluvium over sandstone	0.5-5.0 Hz
			S69E	1.76		
Parkfield June 27, 1966	5.6	Cholame Shandon	N85E	4.26	Alluvium	1.0-4.0 Hz
			N05W	3.48		

M = Magnitude of earthquake; PGA = Peak ground acceleration

Respon seismik dari tiga bangunan yang terisolasi dengan dasar dan tanpa suprastruktur menunjukkan bahwa kekakuan suprastruktur mempengaruhi respon bangunan tinggi yang terisolasi. Hasil isolasi pondasi dalam pengurangan yang signifikan dalam respon struktural untuk bangunan yang diberikan kekakuan dengan yang tidak diberikan kekakuan pada semua gerakan gempa bumi. Namun, perbandingan respon dari bangunan yang pondasi terisolasi dengan dan tanpa diberi kekakuan suprastruktur menunjukkan bahwa tidak ada perubahan yang

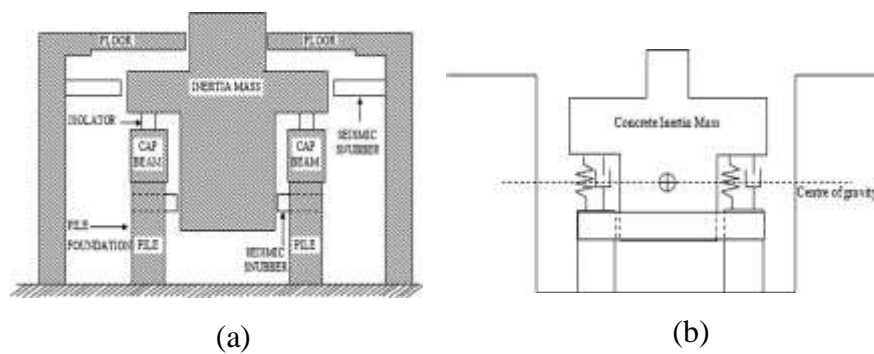
signifikan dalam respon struktural, meskipun pengaruh suprastruktur lebih kaku dalam kasus bangunan tinggi. Akselerasi atap maksimum dan drift lantai maksimum berkurang dengan kekakuan suprastruktur sementara pergeseran lantai dan perpindahan pondasi dari bangunan yang pondasi terisolasi meningkat karena kekakuan suprastruktur. Oleh karena itu, dalam situasi di mana percepatan lantai atau drift interstorey adalah parameter penting, suprastruktur kekakuan bangunan yang pondasi terisolasi memiliki efek menguntungkan.

Peningkatan redaman berhasil menurunkan respons seismik bangunan dengan suprastruktur yang tidak diberi kekakuan. Pemisahan antara periode dasar bangunan ini dengan kondisi tumpuan fixed-base dan base-isolated rendah yang dapat menyebabkan lebih banyak kontribusi pada mode yang lebih tinggi untuk bangunan dan karenanya peningkatan redaman suprastruktur menjadi lebih bermanfaat. Efektivitas redaman suprastruktur lebih terlihat untuk bangunan yang lebih tinggi.

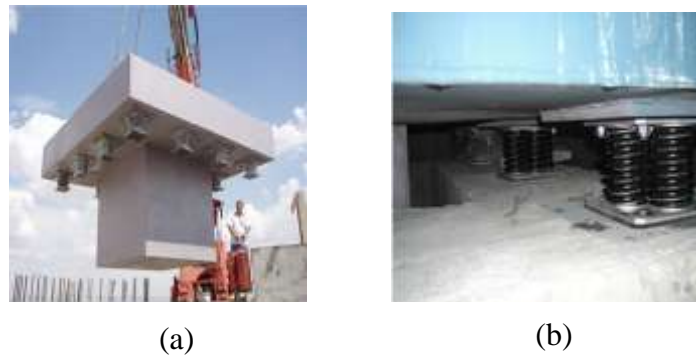
Namun, peningkatan redaman suprastruktur dari 2% hingga 20% umumnya tidak menghasilkan pada penurunan respon seismik yang sangat tinggi dari tiga bangunan yang terisolasi. Peningkatan redaman suprastruktur, di kasus bangunan berlantai 14, menghasilkan efek yang tidak berarti pada perpindahan pondasi maksimum untuk frekuensi tinggi gerakan gempa bumi. Sementara untuk gedung yang sama, ada beberapa penurunan dalam perpindahan pondasi untuk gerakan pondasi yang memiliki frekuensi rendah.

Pada isolasi dasar, yang tidak efektif untuk bangunan yang relatif tinggi, dengan sistem isolasi konvensional basis 2 detik, dapat menjadi layak untuk gerakan gempa dengan frekuensi tinggi serta dengan berbagai konten frekuensi dengan meningkatkan masa isolasi hingga 3,0 detik. Perpindahan maksimum pada tingkat isolasi umumnya meningkat dengan peningkatan fleksibilitas sistem isolasi meskipun perbedaan perpindahan tidak signifikan. Peningkatan perpindahan yang lebih rendah dapat terjadi karena adanya 10% isolasi redaman yang cukup besar untuk mengontrol perpindahan pada tingkat isolasi. Melihat penurunan yang lebih besar pada gaya geser dan akselerasi, peningkatan kecil pada perpindahan pondasi maksimum ini tidak banyak konsekuensinya.

D. Ulgen, O.I. Ertugrul, dan M.Y. Ozkan juga melakukan penelitian mengenai sistem isolasi getaran pada desain pondasi suatu bangunan pada tahun 2016 (8). Sistem isolasi getaran terdiri ini dari massa inersia beton, isolator atau peredam, dan pondasi pada tumpuan kaku. Dalam studi ini, penggunaan elemen isolasi yang sangat fleksibel bertujuan untuk mengurangi beban dinamis yang terjadi pada frekuensi tinggi. Skema dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.14 dan 2.15 di bawah ini.



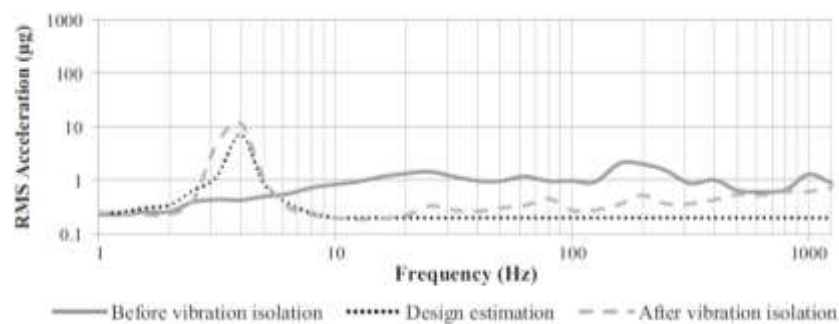
Gambar 2.14 (a) Desain pondasi (b) Skema ilustrasi dari pondasi (8).



Gambar 2.15 (a) Pemasangan isolator getaran pada pondasi bangunan (b) Isolator getaran (8).

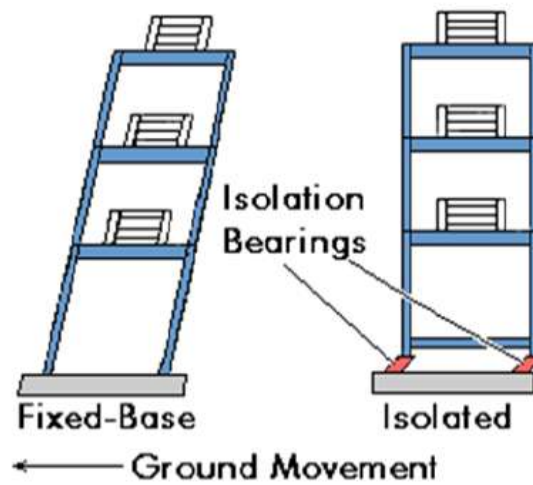
Setelah konstruksi sistem isolasi getaran terpasang pada pondasi, Langkah selanjutnya dilakukan pengukuran getaran untuk menghitung performa dari desain sistem isolasi getaran tersebut. Gambar 2.16 menunjukkan grafik hasil pengukuran awal getaran sebelum dan setelah pemasangan sistem isolasi getaran.

Grafik RMS percepatan cenderung naik seiring dengan kenaikan frekuensi pada saat sebelum terpasang sistem isolasi. Sedangkan setelah terpasang, terdapat kenaikan puncak RMS percepatan pada frekuensi dibawah 10 Hz. Akan tetapi, setelah 10 Hz terjadi penurunan kembali dan cenderung konstan seiring dengan kenaikan frekuensi. Ini menunjukkan bahwa pemasangan sistem isolasi getaran merupakan suatu solusi untuk meminimalisir getaran yang terjadi pada konstruksi pondasi.



Gambar 2.16 Perbandingan pengukuran sebelum dan setelah pemasangan sistem isolasi getaran dan estimasi desain (8).

Masih di tahun yang sama, Prashika Tamang dan kawan-kawan meneliti desain yang aman dan tepat untuk bangunan tahan gempa (9). Jenis isolasi dasar yang diterapkan untuk desain bangunan tahan gempa adalah bantalan karet timbal. Isolasi bantalan karet terdiri dari lapisan karet bolak-balik yang terikat di antaranya pelat baja tipis untuk memberikan fleksibilitas lateral. Selama gerakan gempa, karet menyediakan fleksibilitas yang memungkinkannya bergerak sepanjang gerakan gempa bumi dan perlahan-lahan kembali ke bentuk asli atau posisi ketika bergetar tidak aktif dan dalam hal ini baja yang disediakan antara karet memegang karet ke arah vertikal dengan memberikan kekakuan.



Gambar 2. 17 Pondasi bangunan sebelum dan sesudah diberi isolasi (9).

Bantalan karet timbal digunakan sebagai alas isolasi dimana bantalan ini kaku ke arah vertikal dan sangat fleksibel ke arah horisontal. Kekakuan vertikal dicapai pada lapisan pelat baja 5mm, yang diletakkan di antara setiap lapisan, Hal ini menyebabkan karet tetap pada posisinya.

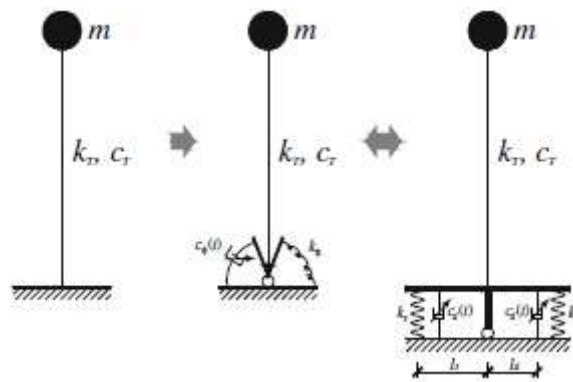


Gambar 2. 18 Gambar nyata isolasi pondasi pada bangunan (9).

Dengan menggunakan isolasi redaman ini, desain yang aman dan tepat berhasil dibangun. Desain ini dapat digunakan untuk menanggung maksimal

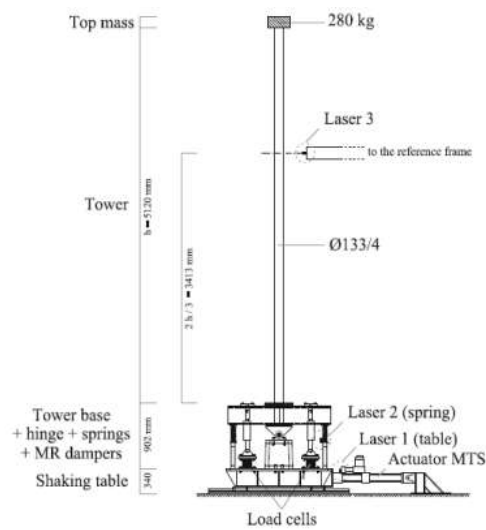
beban gempa bumi dan besarnya maksimum yang dapat ditahan hingga 9 M pada wilayah yang mempunyai beban maksimum gempa bumi 8 M. Metode isolasi pondasi untuk gerakan seismik telah terbukti menjadi metode gempa yang andal desain hambatan tidak seperti bangunan yang tidak diberikan isolasi pada pondasi.

Pada tahun 2014, N. Caterino, C.T. Georgakis, F. Trinchillo, dan A. Occhiuzzi melakukan studi eksperimen mengenai isolator getaran pada turbin angin (10). Isolator yang digunakan adalah jenis isolator semi-aktif yang dapat dikontrol dengan menggunakan peralatan elektronik yang terpasang bersamaan dengan isolator. Turbin angin dimodelkan sebagai sistem dinamis dengan yang mempunyai satu derajat kebebasan (*single degree of freedom*) dengan massa di atas *tower* (m), konstanta pegas dan peredam *tower* (k_T) dan (c_T), konstanta pegas isolator dan peredam *magnetorheological* (k_s) dan ($c_{d(t)}$) yang terkendali di dasar, terlihat seperti pada gambar 2.19 berikut.

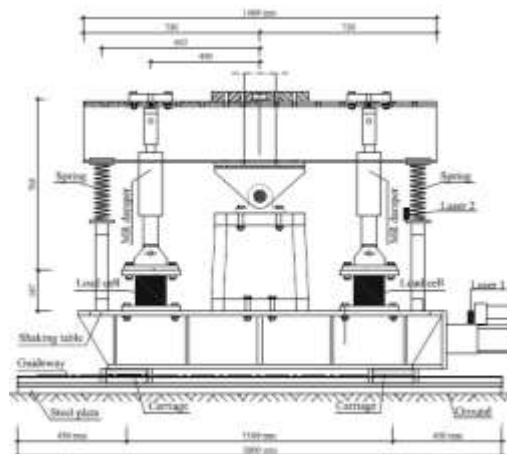


Gambar 2.19 Ide dasar dari kontrol semi aktif pada turbin angin dengan peredam magnetorheological (10).

Eksperimen dilakukan dengan turbin angin yang mempunyai spesifikasi tinggi tiang 5,12 meter yang terbuat terbuat dari baja Q345 (modulus elastisitas 206.000 Mpa, Poisson ratio 0.3, Tegangan yield 345 Mpa), dengan diameter 133 mm dan tebal 4 mm. Sebuah massa 280 kg diletakan di atas *tower*. Tiang ini diletakkan di atas meja yang bergetar seperti terlihat pada gambar 2.15 dan gambar 2.16 menunjukkan gambar detail dari sistem pegas dan peredam *magnetorheological*.

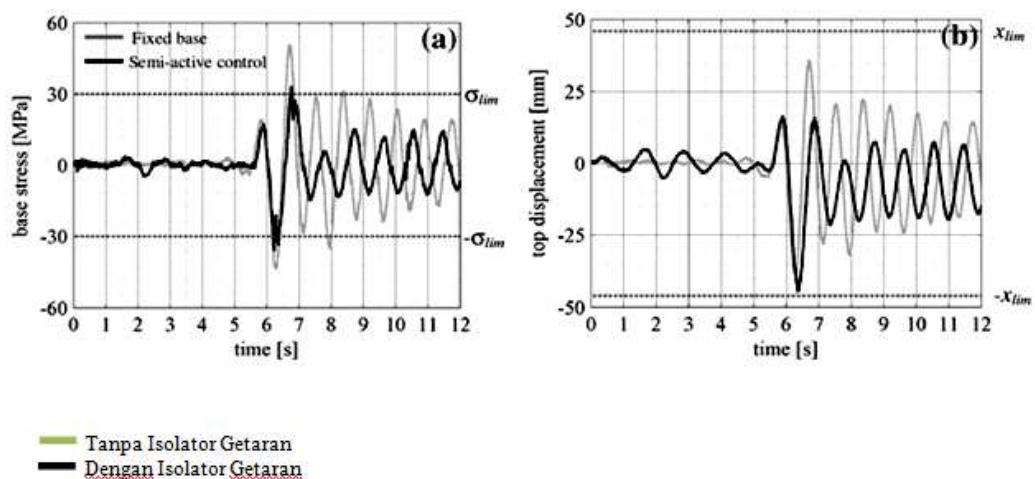


Gambar 2.20 Percobaan turbin angin dengan isolator semi aktif (10).



Gambar 2.21 Detail dari sistem pegas dan peredam magnetorheological (10).

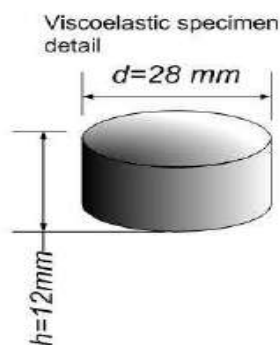
Penelitian ini menghasilkan grafik perbandingan respon getaran dari sistem terlihat pada gambar 2.22. Grafik tersebut merupakan grafik *base stress* terhadap waktu dan Grafik *top displacement* terhadap waktu dengan dan tanpa isolator getaran. Dari Grafik tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa turbin angin yang terpasang sistem isolasi getaran memiliki *base stress* dan *top displacement* yang lebih kecil dan lebih baik dari pada turbin angin dengan pondasi yang tetap atau tanpa sistem isolasi getaran.



Gambar 2.22 (a) Grafik *base stress* terhadap waktu; (b) Grafik *top displacement* terhadap waktu dengan dan tanpa *isolator* getaran (10).

2.3 Pengujian Karet

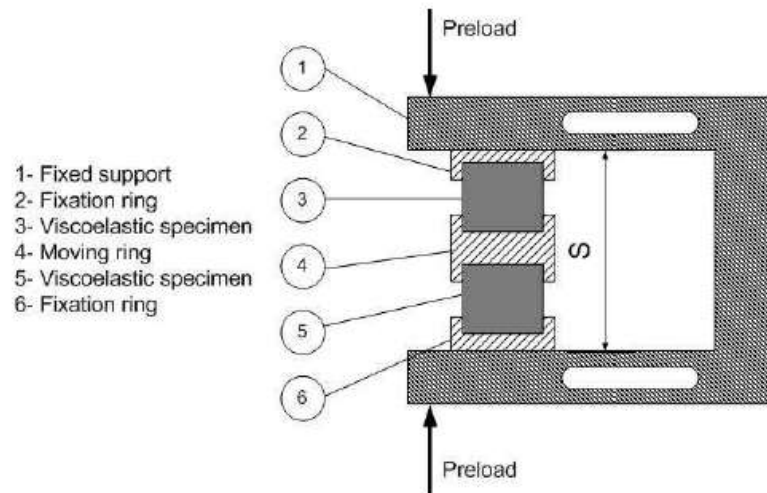
Pada tahun 2011, Francisco Paulo Léopore Neto melakukan eksperimen dengan menggunakan metodologi karakteristik dinamis untuk mengetahui stiffness dan damping dari beberapa sampel peredam *viscoelastic* yang biasanya digunakan sebagai isolator pasif getaran (11). Eksperimen ini menggunakan tiga buah *rubber* dengan kekerasan 25, 33, dan 48 SHORE A dengan detail sebagai berikut:



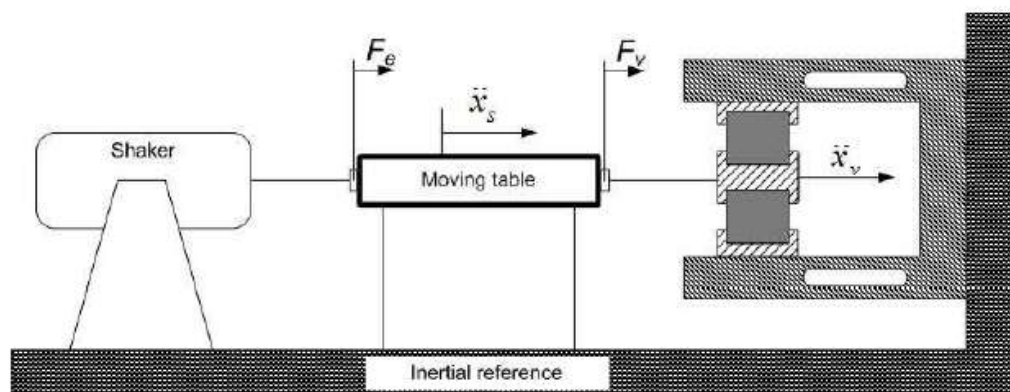
Gambar 2. 23 Detail spesimen (11)

Pada eksperimen ini shaker akan menggerakkan meja dan kemudian meja menggerakkan moving ring yang di bagian atas dan bawahnya telah dipasang

rubber yang diberi beban awal. Hanya gerakan horizontal yang mempengaruhi pengujian ini sedangkan gaya gesek diabaikan.

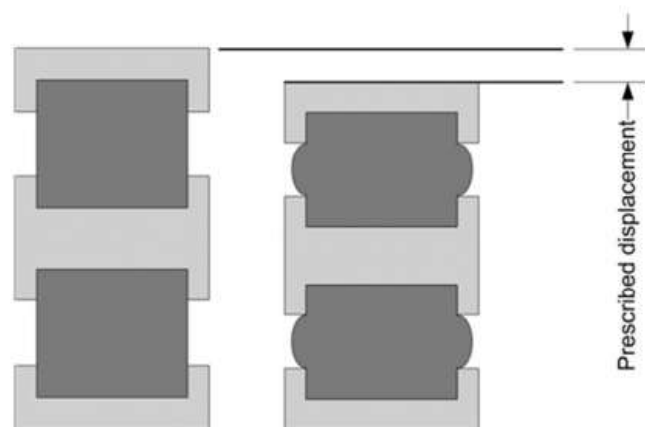


Gambar 2. 24 Preload Device (11).

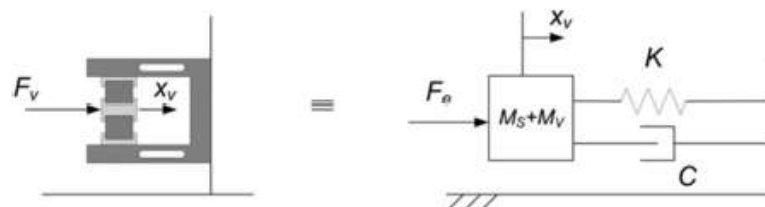


Gambar 2. 25 Perangkat eksperimen (11).

Setelah pembebanan awal, terjadi defleksi seperti pada gambar 2.26. Dengan menggunakan model Voigt (gambar 2.27) yang diadopsi untuk memrepresentasikan peredam viscoelastis dapat diketahui estimasi sifat material yang terdapat pada tabel 2.13 dan parameter fisik dari sistem pengujian getaran yang dapat dilihat pada tabel 2.14.



Gambar 2. 26 kondisi setelah dilakukan pembebanan awal (11).



Gambar 2. 27 Voigh Model (11).

Tabel 2. 13 Estimasi sifat material (11).

Rubber hardness	Without preload		Preload – 10% of strain			
	Stiffness K_v [N/m]	Damping C_v [Ns/m]	Stiffness K_v		Damping C_v	
			Absolute Value [N/m]	Variation	Absolute Value [Ns/m]	Variation
Soft – 25 shore	149,986.61	114.59	163,948.13	9.31%	124.91	9.00%
Medium – 33 shore	244,605.26	144.48	268,906.82	9.93%	150.13	3.91%
Hard – 48 shore	980,356.04	107.37	1,104,445.91	12.66%	102.72	-4.33%

Tabel 2. 14 Parameter fisik (11).

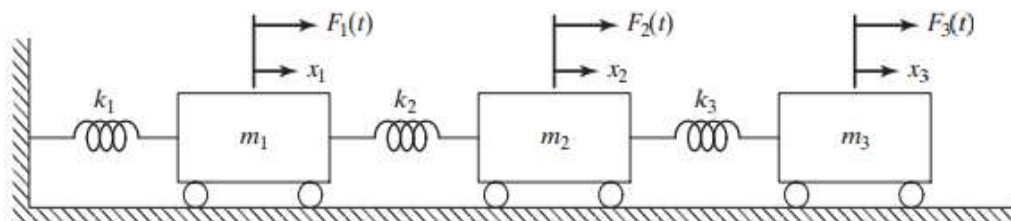
Rubber hardness	Without preload			Preload – 10% of strain		
	Natural Frequency [Hz]	Damping factor ξ	Half power bandwidth [Hz]	Natural Frequency [Hz]	Damping factor ξ	Half power bandwidth [Hz]
Soft – 25 shore	39.50	0.074	5.846	40.75	0.077	6.276
Medium – 33 shore	47.39	0.075	7.109	49.21	0.075	7.382
Hard – 48 shore	79.47	0.027	4.291	81.99	0.027	4.427

2.4 Getaran

Getaran merupakan suatu gerak bolak-balik di sekitar titik kesetimbangan. Kesetimbangan yang dimaksudkan adalah keadaan di mana suatu benda berada pada posisi diam. Parameter dari getaran adalah massa (m), kekakuan (k), dan peredam (c). Massa dan kekakuan adalah potensi untuk terjadinya getaran, sedangkan peredam adalah potensi untuk meredam getaran. Getaran dapat diklasifikasikan berdasarkan gangguannya, derajat kebebasan, sistem getarnya. Getaran berdasarkan gangguannya dibedakan menjadi getaran bebas dan getaran paksa. Getaran paksa merupakan getaran yang terjadi pada sistem disebabkan oleh gaya eksitasi periodik yang bekerja kontinu sebagai fungsi waktu. Sedangkan, getaran berdasarkan derajat kebebasannya dibedakan menjadi getaran single degree of freedom dan multi degree of freedom. Hal ini sesuai dengan banyaknya koordinat bebas.

Karena sistem *multi degree of freedom (MDOF)* memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks, maka digunakan matriks untuk merepresentasikan sistem *MDOF*. Sistem *MDOF* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *Forced MDOF* dan *Free MDOF*.

Forced MDOF vibration merupakan peristiwa getaran yang terjadi pada suatu sistem *MDOF* yang disebabkan adanya gaya eksternal. Sistem derajat kebebasan ganda merupakan sistem yang memiliki beberapa komponen massa yang dihubungkan oleh elemen pegas yang masing-masing berjumlah lebih dari dua. Analisa getaran *MDOF* merupakan analisa yang sering digunakan karena fenomena di dunia nyata kebanyakan merupakan sistem dengan *MDOF*. Sistem *forced multi dof vibration* dapat dimodelkan pada gambar 2.28 (12).



Gambar 2. 28 Skema *forced multi degree of freedom* getaran (12).

Dari gambar 2.28 maka akan didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum_i F_i \quad (2.55)$$

Persamaan 2.21 di atas terdiri dari $i=1$, $i=2$ dan $i=3$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{aligned} [m] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \\ [k] &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}, \\ [F] &= \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.21 ke persamaan 2.22, maka akan didapatkan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

2.5 Isolator Getaran

Isolasi getaran adalah suatu cara atau perangkat yang digunakan untuk mengurangi dampak dari getaran. Isolator getaran ini terbagi atas isolator getaran aktif (gambar 2.29) dan isolator getaran pasif (gambar 2.30). Isolator aktif terdiri dari mekanisme dengan sensor, sinyal, dan aktuator.

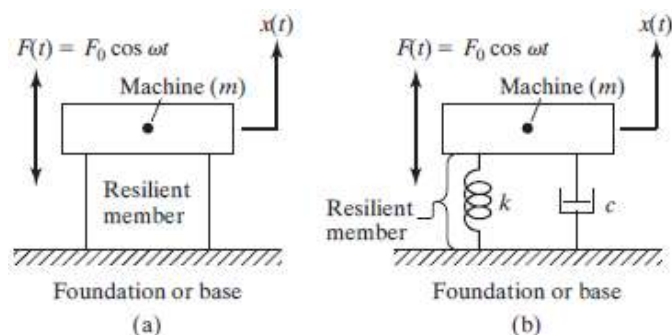


Gambar 2. 29 Active vibration isolator (13) (14).



Gambar 2. 30 Passive vibration isolator (15) (16).

Jika suatu mesin terpasang pada pondasi yang rigid, selain beban statis dari berat mesin, pondasi akan dikenakan beban harmonik akibat ketidakseimbangan dari mesin. Oleh karena itu, material elastis diletakkan diantara mesin dan pondasi yang rigid untuk mengurangi gaya yang di transmisikan ke pondasi. Sistem tersebut dapat diidealkan sebagai sistem *single-degree-of-freedom*, seperti pada gambar 2.31(a). Komponen elastis dapat dimodelkan sebagai sebuah pegas k dan peredam c , terlihat pada gambar 2.31(b). Hal ini diasumsikan bahwa kerja mesin memberikan kenaikan variasi gaya yang harmonik $F(t) = F_0 \cos \omega t$.



Gambar 2. 31 Mesin dan komponen elastis pada pondasi rigid (a) sistem single dof ; (b) sistem massa-pegas-peredam (12).

Persamaan gerak dari mesin yang bermassa m dapat dituliskan sebagai berikut.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2. 58)$$

Persamaan *steady-state* dari persamaan (2.24) adalah sebagai berikut.

$$x(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (2. 59)$$

Dimana

$$X = \frac{F_0}{[(k-m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (2. 60)$$

Dan

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega c}{k-m\omega^2} \right) \quad (2. 61)$$

Gaya yang ditransmisikan ke pondasi melewati pegas dan peredam, $F_t(t)$, dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} F_t(t) &= kx(t) + c\dot{x}(t) \\ F_t(t) &= kX \cos(\omega t - \phi) - c\omega X \sin(\omega t - \phi) \end{aligned} \quad (2. 62)$$

Besar dari total gaya yang ditransmisikan (F_T) adalah sebagai berikut.

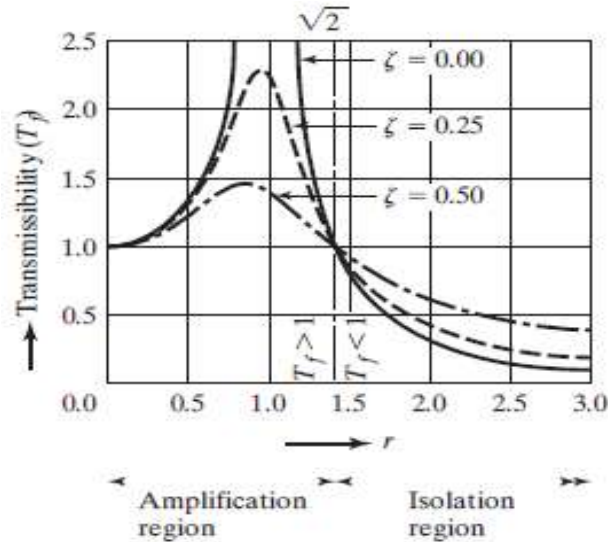
$$\begin{aligned} F_T &= [(kx)^2 + (c\dot{x})^2]^{\frac{1}{2}} = X\sqrt{k^2 + \omega^2 c^2} \\ F_T &= \frac{F_0(k^2 + \omega^2 c^2)^{\frac{1}{2}}}{[(k-m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (2. 63)$$

Performa dari sistem isolasi atau transmisibilitas dari isolator (T_f) didefinisikan sebagai rasio dari besar dari gaya yang ditransmisikan oleh gaya luar:

$$T_f = \frac{F_T}{F_0} = \left\{ \frac{k^2 + \omega^2 c^2}{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$T_f = \left\{ \frac{1 + (2\zeta r)^2}{[1 - r^2]^2 + (2\zeta r)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.64)$$

Dimana $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ adalah rasio frekuensi. Variasi dari T_f dengan rasio frekuensi $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ terlihat pada gambar 2.32. Untuk dapat mencapai isolasi, gaya eksternalnya harus lebih besar daripada gaya yang ditransmisikan ke pondasi, seperti yang terdapat pada gambar 2.32. Frekuensi harus dipaksakan lebih besar dari $\sqrt{2}$ kali frekuensi natural sistem supaya mencapai isolasi getaran.



Gambar 2. 32 Variasi dari rasio transmisibilitas T_f dengan r (12).

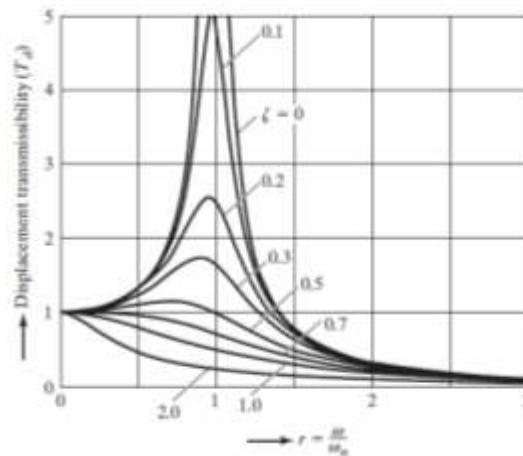
Persamaan (2.30) hanya berlaku untuk nilai damping ratio ζ yang kecil dan untuk rasio frekuensi $r > 1$, sehingga persamaan tersebut dapat ditulis:

$$T_f = \frac{F_T}{F} \approx \frac{1}{r^2 - 1} \text{ or } r^2 \approx \frac{1 + T_f}{T_f} \quad (2.65)$$

Pada beberapa sistem isolasi dibutuhkan untuk mengurangi gerak dari mesin m terhadap gaya yang bekerja pada sistem tersebut. Amplitudo perpindahan dari massa m terhadap gaya $F(t)$ pada persamaan (2.26) dapat dinyatakan dengan:

$$T_d = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{kX}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.66)$$

Variasi dari transmisibilitas perpindahan dengan rasio frekuensi r untuk beberapa nilai dari rasio redaman ζ dapat dilihat pada gambar berikut.



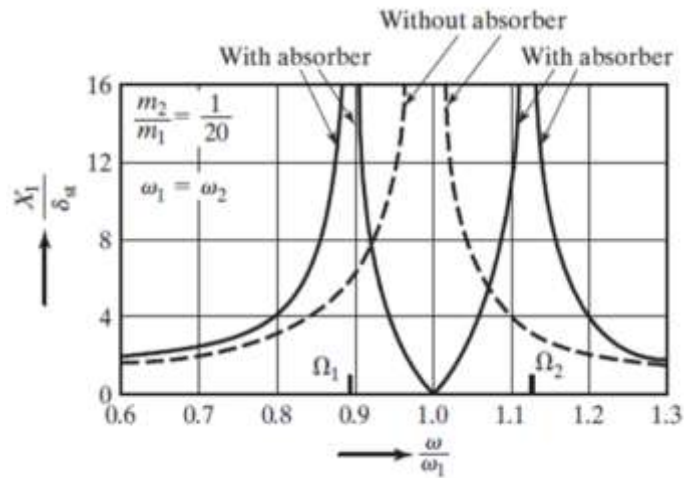
Gambar 2. 33 Variasi transmisibilitas perpindahan (T_d) dengan r (12).

2.6 Dynamic Vibration Absorber (DVA)

Dynamic Vibration Absorber atau DVA merupakan suatu kontrol untuk meredam getaran dinamik yang bergerak secara bersama-sama dengan sistem utama yang bertujuan untuk membantu meredam getaran yang terjadi. Pada sistem utama, DVA dimodelkan dengan adanya penambahan massa, pegas, dan damper.

Dengan memasang DVA pada sistem utama akan menghasilkan sebuah sistem dengan 2 derajat kebebasan (DOF) sehingga sistem ini mempunyai dua buah frekuensi natural. Penggunaan DVA pada sistem utama akan membagi dan mereduksi rasio frekuensi natural sistem menjadi dua bagian sehingga menimbulkan rasio frekuensi natural yang berbeda. Hal inilah yang menyebabkan DVA dapat mengurangi getaran.

Pengaruh sebuah sistem ketika dipasang DVA maupun tidak dipasang DVA dapat terlihat pada gambar berikut.

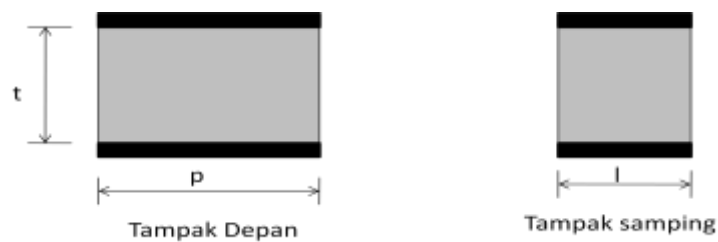


Gambar 2. 34 Respon tanpa DVA dan dengan DVA (12).

2.7 Elastomer

Elastomer merupakan sebuah *polymer* yang dapat mulur ketika ditarik dan dapat kembali ke bentuk semula ketika gaya tarik itu dihilangkan. Bahan elastomer ini biasanya disebut karet yang mempunyai sifat lentur, elastis, dan kuat. Elastomer padat sebagai *bentuk padat yang harus memiliki tonjolan untuk berdefleksi. Karena itu, faktor bentuk (shape factor) atau faktor tonjolan (bulge)* harus dioptimasi untuk mendapatkan *stiffness* yang diharapkan.

- Elastomer berbentuk balok



Gambar 2. 35 Elastomer berbentuk balok.

Shape factor:

$$S = \frac{\text{Luas Load}}{\text{Luas bulge}}$$

$$S = \frac{lw}{2tl + 2wt}$$

$$S = \frac{lw}{2t(l+w)} \quad (2.67)$$

Modulus Elastisitas koreksi:

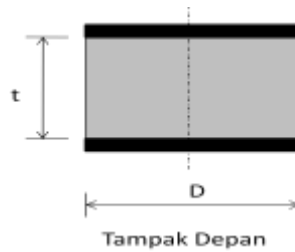
$$E_c = \frac{4}{3}E(1 + S^2) \quad (2.68)$$

Stiffness:

$$K = \frac{E_c A}{t}$$

$$K = \frac{E_c lw}{t} \quad (2.69)$$

- Elastomer berbentuk silinder



Gambar 2. 36 Elastomer berbentuk silinder.

Shape factor:

$$S = \frac{\text{Luas Load}}{\text{Luas bulge}}$$

$$S = \frac{\frac{\pi}{4}D^2}{\pi Dt}$$

$$S = \frac{D}{4t} \quad (2.70)$$

Modulus Elastisitas koreksi:

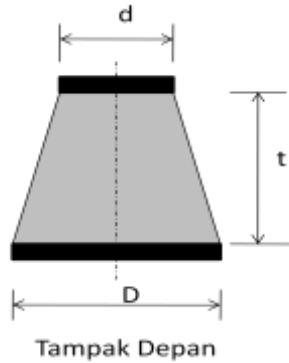
$$E_c = E(1 + 2S^2) \quad (2.71)$$

Stiffness:

$$K = \frac{E_c A}{t}$$

$$K = \frac{E_c \pi d^2}{4t} \quad (2.72)$$

- Elastomer berbentuk taper



Gambar 2. 37 Elastomer berbentuk taper

Shape factor:

$$S = \frac{\text{Luas Load}}{\text{Luas bulge}}$$

$$S = \frac{\frac{\pi}{4} d^2}{\frac{\pi}{2} s_2 (D + d)}$$

dimana s_2 :

$$s_2 = \sqrt{\frac{1}{4} (D - d)^2 + t^2}$$

Sehingga:

$$S = \frac{\frac{\pi}{4} d^2}{\frac{\pi}{2} (D + d) \sqrt{\frac{1}{4} (D - d)^2 + t^2}}$$

$$S = \frac{d^2}{2(D+d) \sqrt{\frac{1}{4} (D-d)^2 + t^2}} \quad (2.73)$$

Modulus Elastisitas koreksi:

$$E_c = E(1 + 2S^2) \quad (2.74)$$

Stiffness:

$$K = \frac{E_c A}{t}$$

$$K = \frac{E_c \pi d^2}{4t} \quad (2.75)$$

Besarnya redaman dari elastomer dapat hitung dengan menggunakan rumus berikut.

$$c = \zeta c_c$$

Dimana:

$$c_c = 2m\omega_n = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\sqrt{km}$$

Sehingga:

$$c = 2\zeta\sqrt{km} \quad (2.76)$$

(halaman ini sengaja dikosongkan)

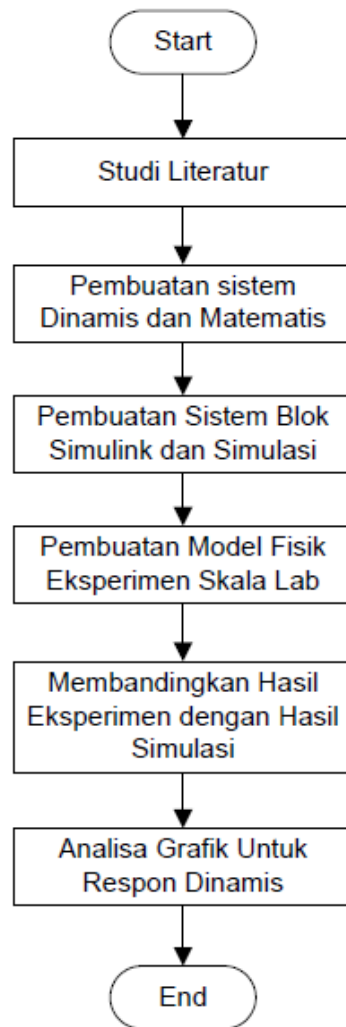
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Dalam penulisan penelitian ini dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1. Proses awal dalam melakukan penelitian ini adalah studi literatur dan identifikasi masalah. Setelah mengidentifikasi masalah, penyelesaian masalah dilakukan dengan membuat model dinamis yang dilanjutkan dengan model matematis. Langkah selanjutnya adalah mencari parameter-parameter yang akan digunakan dalam simulasi yang mana parameter-parameter tersebut harus sesuai dengan parameter yang digunakan selama pengujian. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat. Setelah parameter-parameter ditetapkan, dibuatlah blok diagram simulasi dan rancangan model eksperimen dari penelitian. Langkah terakhir adalah pengambilan data setelah model untuk eksperimen telah berhasil dibuat. Hasil yang diperoleh dari eksperimen kemudian dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan perangkat lunak numerik.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemasangan dan variasi karet peredam pada pondasi pada sistem turbin angin. Setelah dibandingkan, selanjutnya dilakukan analisa grafik respon dinamis pada pada sistem akibat dipasangnya karet peredam dan variasi karet peredam yang dipasang.



Gambar 3. 1 Diagram alir penulisan penelitian

3.2 Tahap Studi Literatur

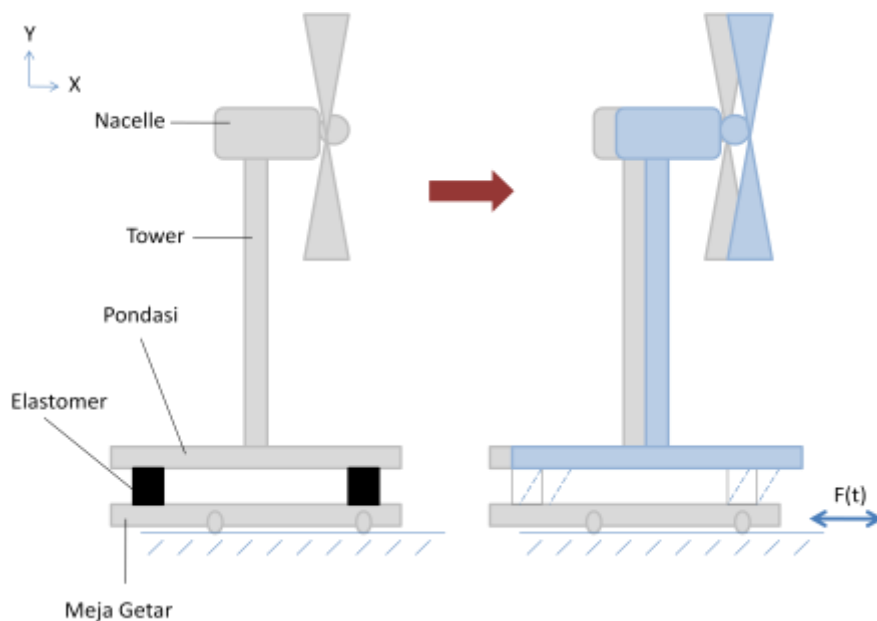
Dalam penulisan tesis ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis sistem isolasi getaran pada pondasi turbin angin. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi dan rotasi, serta pembuatan blok diagram simulink. Nilai parameter yang digunakan didapatkan berdasarkan referensi. Referensi untuk studi literatur

didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan.

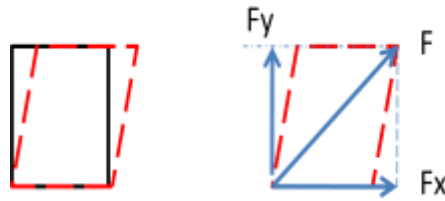
3.3 Pemodelan Sistem Dinamis dan Persamaan Gerak

Pemodelan sistem dinamis dari penelitian merupakan pemodelan sistem utama dengan menggunakan 4 buah peredam elastomer. Setelah membuat pemodelan sistem dinamis, selanjutnya adalah pembuatan persamaan gerak untuk masing-masing analisa dengan membangun *free body diagram* dari model fisik yang sudah disederhanakan. Diketahui dari *free body diagram*, didapatkan komponen gaya yang sejenis akan dijumlahkan dengan menggunakan hukum newton. Setelah itu, persamaan gerak tersebut diubah dalam bentuk state variable dengan cara merubah bentuk persamaan kedalam persamaan diferensial ordo satu.

Gaya eksitasi angin diwakilkan oleh gaya eksitasi dari massa *unbalance* yang diletakkan pada meja getar. Model fisik dapat dilihat pada gambar berikut.

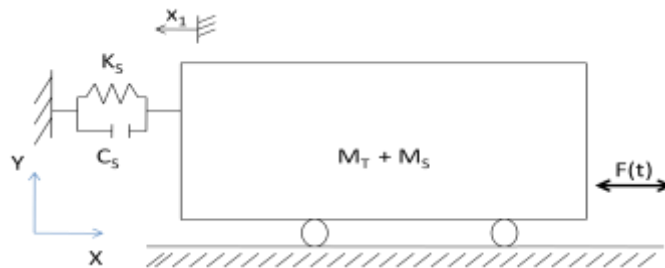


Gambar 3. 2 Model fisik eksperimen penelitian



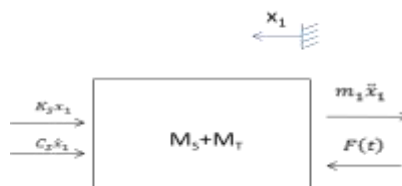
Gambar 3. 3 Penguraian gaya pada elastomer

Berikut ini adalah bentuk dinamis dari sistem sebelum diberikan elastomer.



Gambar 3. 4 Model dinamis sebelum diberikan elastomer

Sebelum diberikan elastomer, meja getar mempunyai 1 derajat kebebasan. Massa yang ditinjau adalah gabungan massa meja getar dengan massa turbin. Gerakan dari sistem ini hanya satu, yaitu gerakan ke arah translasi saja. FBD dari sistem sebelum diberikan meja getar dapat dilihat pada gambar 3.5.



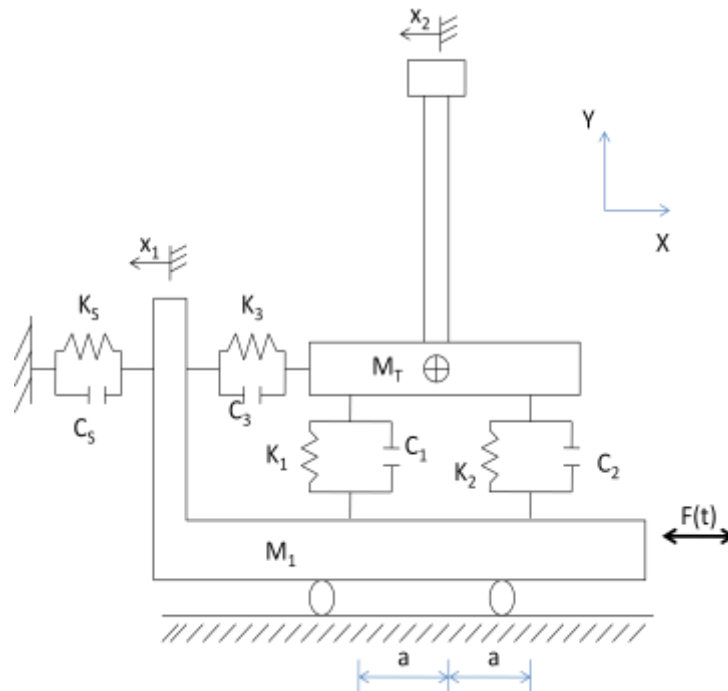
Gambar 3. 5 FBD sistem tanpa elastomer

$$\begin{aligned}\sum F_X &= (m_T + m_S)\ddot{x}_1 \\ F(t) - K_S x_1 - C_S \dot{x}_1 &= (m_T + m_S)\ddot{x}_1 \\ F(t) - K_S x_1 - C_S \dot{x}_1 - (m_T + m_S)\ddot{x}_1 &= 0\end{aligned}\quad (3.1)$$

State variable dari meja getar:

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{(m_T + m_S)} [F(t) - K_S x_1 - C_S \dot{x}_1] \quad (3.2)$$

Untuk sistem setelah diberikan elastomer, gambar fisik pada gambar 3.2 dapat dibuat gambar dinamis sistem sebagai berikut.



Gambar 3. 6 Model dinamis eksperimen penelitian ketika telah diberikan elastomer

Meja getar bermassa M_1 yang mendapatkan gaya eksitasi mempunyai 1 derajat kebebasan (DOF), yaitu gerakan translasi. Massa tower M_2 dan pondasi M_3 yang menjadi satu kesatuan menjadi M_T mempunyai 2 DOF, yaitu rotasi dan translasi. Tower mempunyai nilai kekakuan sebesar K_4 . Antara meja getar dan tower terdapat peredam elastomer yang mempunyai kekakuan K_1 , K_2 , K_3 , dan redaman C_1 , C_2 , C_3 . Jadi pada sistem ini mempunyai 3 derajat kebebasan.

- *Free Body Diagram* Meja Getar (M_1)

$$\begin{aligned}
C_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_3(x_1 - x_2) &= m_T \ddot{x}_2 \\
m_T \ddot{x}_2 - C_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_3(x_1 - x_2) &= 0
\end{aligned} \tag{3.5}$$

State variable translasi dari *tower* dan pondasi (M_T):

$$\ddot{x}_T = \frac{1}{m_T} [C_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_3(x_1 - x_2)] \tag{3.6}$$

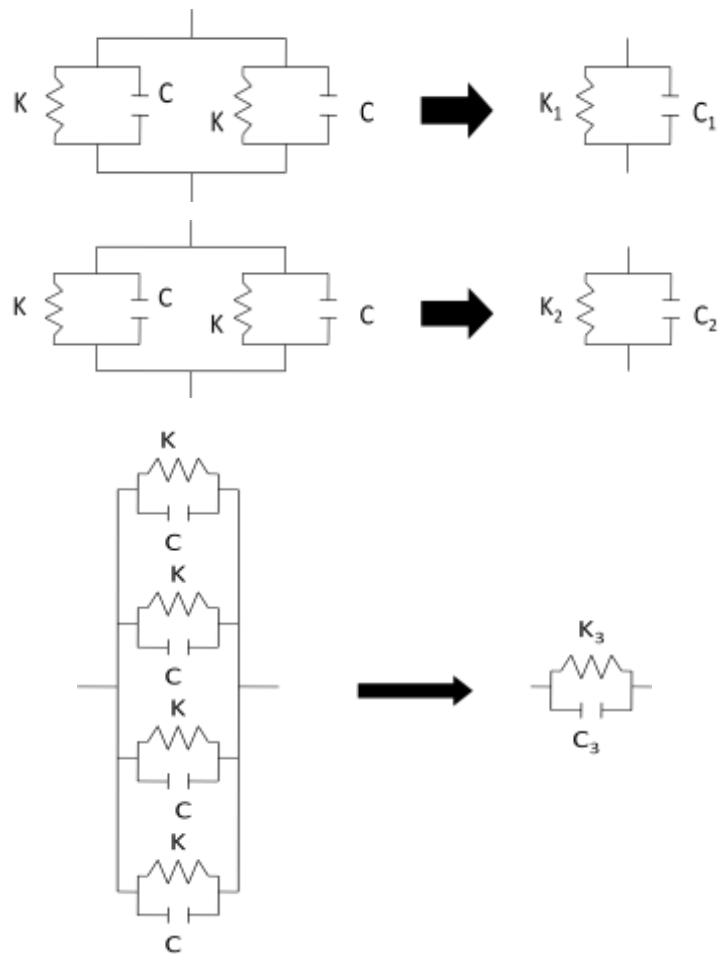
Gerakan rotasi:

$$\begin{aligned}
\Sigma M_{CG} &= J \ddot{\theta} \\
-C_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)Y - K_3(x_1 - x_2)Y - C_1 a^2 \dot{\theta} - K_1 a^2 \theta - C_2 a^2 \dot{\theta} - K_2 a^2 \theta &= J \ddot{\theta}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

State variable rotasi dari *tower* dan pondasi (M_T):

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta} &= \frac{1}{J} \{-C_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)Y - K_3(x_1 - x_2)Y - C_1 a^2 \dot{\theta} - K_1 a^2 \theta - C_2 a^2 \dot{\theta} - K_2 a^2 \theta\} \\
\ddot{\theta} &= \frac{1}{J} \{-C_3(\dot{x}_1 - L_{CG} \dot{\theta})Y - K_3(x_1 - L_{CG} \dot{\theta})Y - C_1 a^2 \dot{\theta} - K_1 a^2 \theta - C_2 a^2 \dot{\theta} - K_2 a^2 \theta\}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Elastomer mempunyai penguraian ke arah vertikal (sumbu Y) dan arah horizontal (sumbu X) saat diberi massa di atasnya. K_1 dan C_1 adalah nilai kekakuan dan redaman dari elastomer di sebelah kiri yang mempunyai arah vertikal ke arah sumbu Y. Pada sisi ini terdapat dua buah elastomer yang dihubungkan secara paralel. K_2 dan C_2 adalah nilai kekakuan dan redaman dari elastomer di sebelah kanan yang mempunyai arah vertikal ke arah sumbu Y. Di sisi ini juga terdapat dua buah elastomer yang dihubungkan secara paralel. K_3 dan C_3 adalah nilai kekakuan dan redaman dari elastomer yang mempunyai arah horizontal ke arah sumbu X. Pada sisi ini terdapat empat buah elastomer yang dihubungkan paralel. Dari uraian ini dapat diketahui nilai kekakuan K_1 , K_2 , dan K_3 serta nilai redaman C_1 , C_2 , dan C_3 .



Gambar 3. 9 Gambar dinamis dari empat elastomer.

- Mencari nilai K₁ dan C₁

$$K_1 = K + K$$

$$K_1 = 2K \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C}$$

$$C_1 = \frac{C}{2} \quad (3.10)$$

- Mencari nilai K₂ dan C₂

$$K_2 = K + K$$

$$K_2 = 2K \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C}$$

$$C_2 = \frac{C}{2} \quad (3.12)$$

- Mencari nilai K_3 dan C_3

$$K_3 = K + K + K + K$$

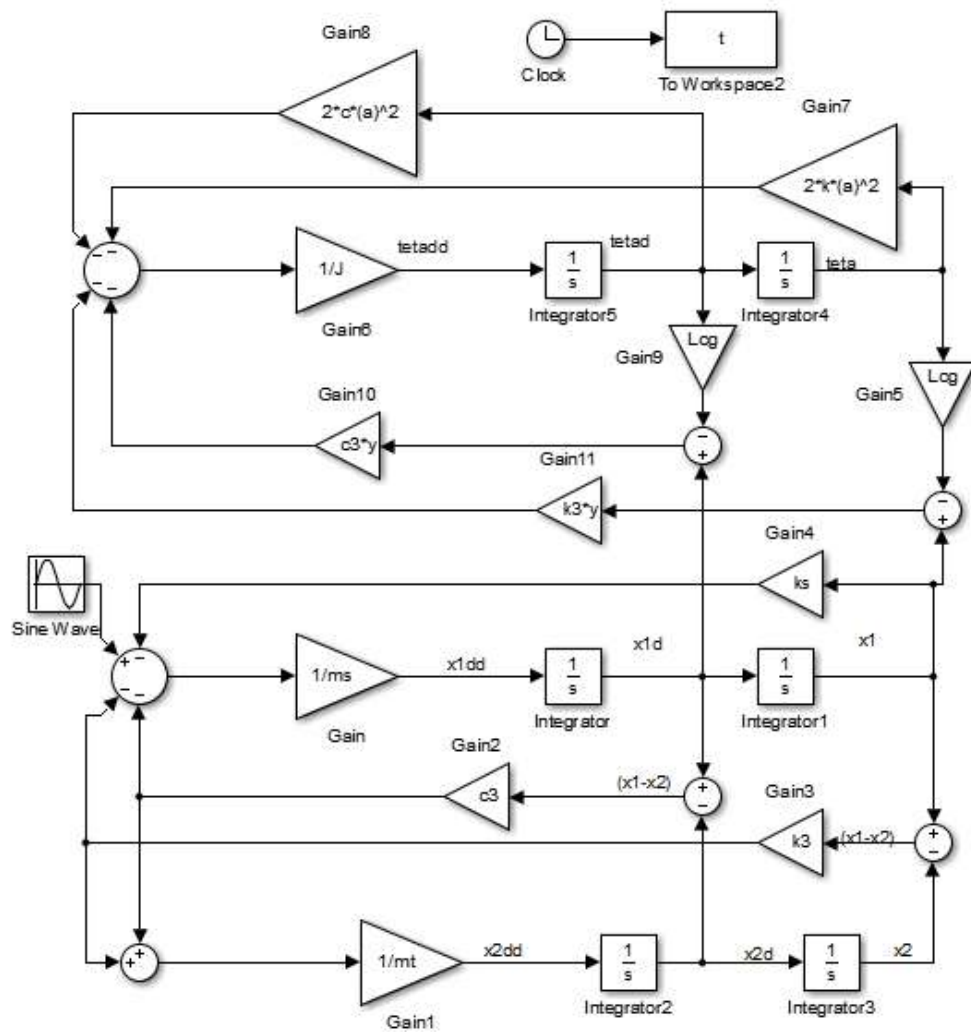
$$K_3 = 4K \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{C_3} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{4}{C}$$

$$C_3 = \frac{C}{4} \quad (3.14)$$

3.4 Pembuatan Blok Simulink

Blok diagram ini dibuat pada suatu software numerik, yaitu Matlab simulink. Blok diagram ini dibuat dengan mengacu pada state variable dari persamaan 3.2, 3.4, dan 3.6. Simulasi ini bertujuan mengetahui respon dinamis dari beberapa tinjauan massa. Selain itu simulasi digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimen yang didapat. Respon dinamis yang didapat dari simulasi ini adalah data perpindahan atau defleksi dan percepatan dari beberapa tinjauan massa ketika dipasang karet peredam dengan beberapa variasi bentuk yang berbeda-beda. Blok diagram dari penelitian ini dapat dilihat dari gambar berikut.



Gambar 3. 10 Blok diagram penelitian

Model eksperimen ini diberikan gaya eksitasi yang berupa input sinusoidal dari massa unbalance. Massa unbalance ini mempunyai frekuensi kerja antara 8 Hz. Massa unbalance yang diberikan sebesar 1,2 Kg dengan jari-jari 0,035 m. Gaya eksitasi yang diberikan sebesar:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= F \cos \omega t \\
 F(t) &= m\omega^2 R \cos \omega t \\
 F(t) &= m(2\pi f)^2 R \cos(2\pi f)t \\
 F(t) &= 1,2(2\pi \times 8)^2 0,06 \cos(2\pi \times 8)t \\
 F(t) &= 181.73 \cos 50.24t
 \end{aligned}
 \tag{3. 15}$$

3.5 Parameter

Parameter-parameter yang digunakan untuk membuat model eksperimen dalam penelitian ini dapat dilihat melalui tabel berikut.

Tabel 3. 1 Tabel Parameter

No.	Parameter	Satuan	Nilai	Ketersngan
1	M_1	Kg	8.9	Massa meja getar
2	M_T	Kg	4	Massa Turbin
3	K_s	N/m	200	Kekakuan meja getar
4	$K_1=K_2$	N/m	2K	Kekakuan peredam
5	$C_1=C_2$	Ns/m	C/2	Redaman peredam
6	K_3	N/m	4K	Kekakuan peredam
7	C_3	Ns/m	C/4	Redaman peredam
8	a	m	0,12 dan 0,04	Jarak peredam terhadap CG

- Peredam Elastomer

Elastomer berbentuk kotak mempunyai $k=5722.5$ N/m dan $c=0.489374$ Ns/m. Elastomer berbentuk silinder mempunyai $k=42091.875$ N/m dan $c=0,375667$ Ns/m. Elastomer berbentuk taper mempunyai $k=3121.36$ N/m dan $c=3121.36$ Ns/m.

- Jarak peredam elastomer (a).

Jarak peredam elastomer (a) adalah jarak peredam elastomer dari titik pusat massa tower model turbin angin. Jarak a yang divariasikan pada penelitian ini adalah 40 mm dan 120 mm.



(a)

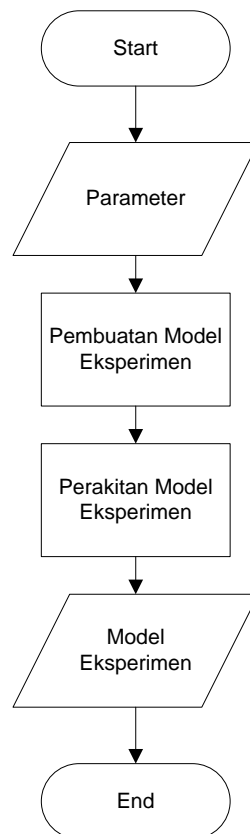


(b)

Gambar 3. 11 Gambar posisi peredam elastomer (a) $a=12$ cm (b) $a=4$ cm

3.6 Pembuatan Model Eksperimen

Setelah parameter ditentukan, langkah selanjutnya adalah membuat model eksperimen. Diagram alir dalam pembuatan model eksperimen penelitian ini dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3. 12 Diagram alir pembuatan model eksperimen penelitian

Tahap pertama pembuatan model eksperimen adalah dengan menentukan parameter-parameter dari model eksperimen. Hal ini meliputi menentukan ukuran, massa, dan material yang dihitung menggunakan simulasi agar terlihat seberapa besar perkiraan *displacement* yang terjadi. Setelah parameter-parameter ditentukan, dibuatlah model eksperimen ke bengkel dengan dasar menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan. Setelah alat eksperimen jadi, alat eksperimen dirakit satu persatu sehingga menjadi satu kesatuan. Step terakhir, jadilah model eksperimen turbin angin yang mempunyai ooredam elastomer yang dihubungkan di atas meja getar.

Adapun material-material yang digunakan untuk membuat komponen dari model eksperimen dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Material yang digunakan.

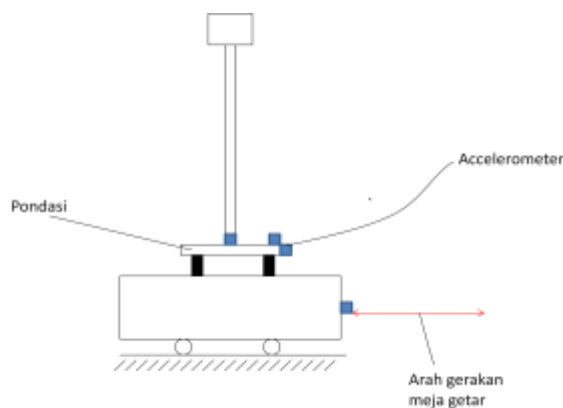
No.	Komponen	Material	Spesifikasi
1	Turbin	Alumunium	$E = 69 \text{ GPA}$ $\rho = 2730 \text{ Kg/m}^3$
2	Karet peredam	Neoprene	spon

3.7 Pengambilan data eksperimen

Pengambilan data eksperimen dilakukan dengan menggunakan pengujian model dengan input yang berasal dari meja goyang. Pengambilan data ini dapat dirangkum melalui diagram alir pada gambar 3.18. Pengambilan data menggunakan accelerometer yang diletakkan tegak lurus arah gerakan. Accelerometer ini diletakkan di pondasi. Gambar dan peletakan accelerometer dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3. 13 Accelerometer



Gambar 3. 14 Peletakan Accelerometer

Accelerometer ini dihubungkan ke power supply pada port sensor. Dan pada port output dihubungkan osciloscop. Data yang keluar pada grafik berupa grafik tegangan.



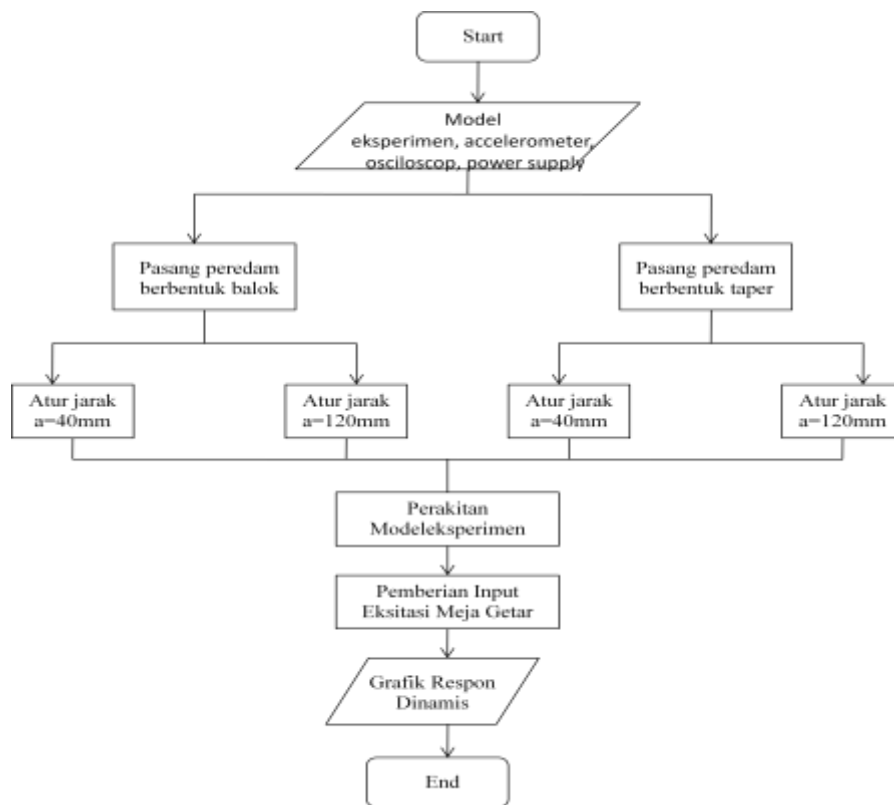
Gambar 3. 15 Power supply



Gambar 3. 16 Osciloscop



Gambar 3. 17 Alat uji eksperimen



Gambar 3. 18 Diagram alir pengambilan data eksperimen penelitian

3.8 Analisa Grafik Respon Dinamis

Yang akan dibahas pada bagian ini adalah hasil respon dinamis yang berupa grafik. Grafik respon dinamis yang akan dibahas ini adalah grafik respon dinamis yang diperoleh dari hasil simulasi maupun eksperimen. Selain itu, akan dibahas bagaimana pengaruh variasi bentuk dan jarak peredam elastomer yang dipasang pada pondasi sistem dan mengetahui bentuk dan jarak elastomer yang handal dalam mereduksi getaran.

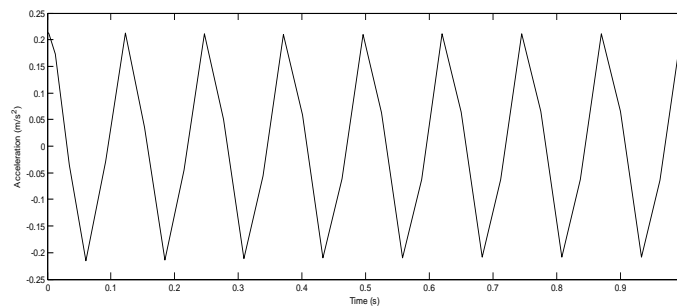
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

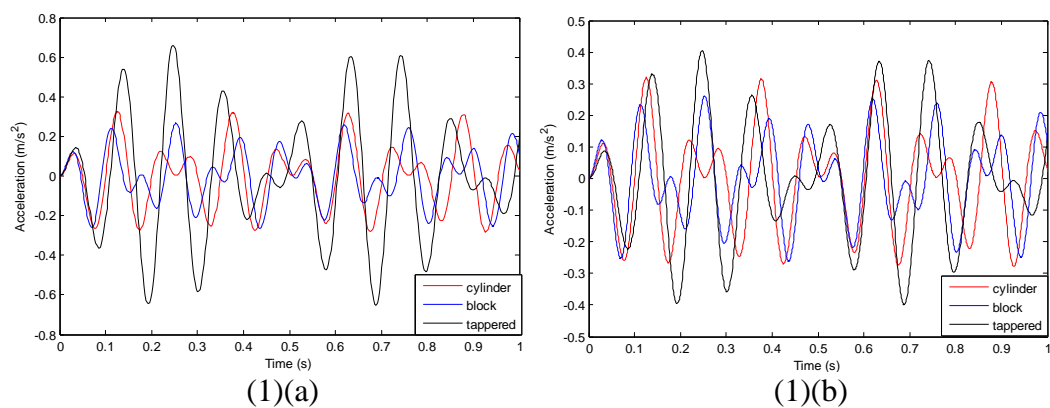
Pada bab ini akan dibahas bagaimana respon yang dihasilkan dari sistem baik secara simulasi maupun eksperimen. Menganalisis bagaimana respon ketika sebelum dan sesudah menggunakan elastomer. Selain itu, pada bab ini dapat dianalisis bagaimana pengaruh bentuk dan posisi letak dari elastomer.

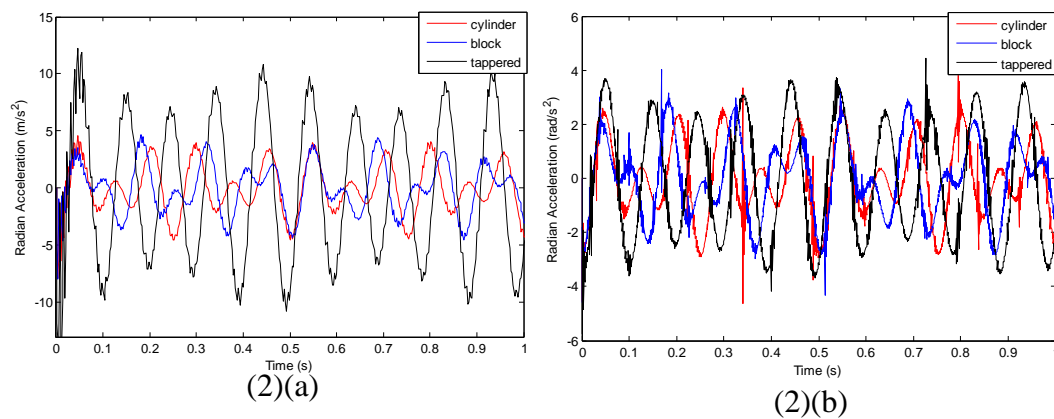
4.1 Analisa Respon Simulasi pada Pondasi



Gambar 4. 1 Respon percepatan sebelum dipasang peredam elastomer

Gambar 4.1 merupakan grafik respon percepatan sebelum sistem diberikan peredam elastomer. RMS respon percepatan dari grafik ini adalah 0.2969m/s^2 .





Gambar 4. 2 Grafik simulasi respon percepatan (1) translasi dan (2) sudut pada pondasi ketika (a) $a=4$ cm dan (b) $a=12$ cm.

Setelah dipasang elastomer, respon percepatan dapat disajikan pada gambar 4.2. Respon percepatan translasi untuk posisi peredam elastomer pada $a=4$ cm dapat dilihat pada gambar 4.2 (1)(a) dan $a=12$ cm pada gambar 4.2 (1)(b). RMS dari percepatan pada pondasi adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 RMS percepatan simulasi pondasi

NO	ELASTOMER	PERCEPATAN (m/s^2)	
		$a=4$ cm	$a=12$ cm
1	Taper	0.1968	0.1818
2	Silinder	0.1446	0.1414
3	Kotak	0.1212	0.1168

Pada simulasi, RMS percepatan elastomer berbentuk taper lebih tinggi daripada elastomer berbentuk silinder dan kotak. Hal ini disebabkan nilai kekakuan dari taper lebih kecil dibandingkan dengan elastomer berbentuk silinder dan kotak. RMS percepatan paling kecil ketika sistem menggunakan elastomer berbentuk kotak dimana elastomer kotak mempunyai nilai kekakuan paling besar. Respon percepatan untuk elastomer berbentuk kotak adalah $0.121 m/s^2$ ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=4$ cm dan $0.117 m/s^2$ ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12$ cm. RMS percepatan lebih kecil ketika elastomer

diletakkan pada posisi $a=12\text{cm}$. Pada $a=12\text{cm}$, frekuensi natural pondasi lebih besar daripada frekuensi natural ketika $a=4\text{ cm}$.

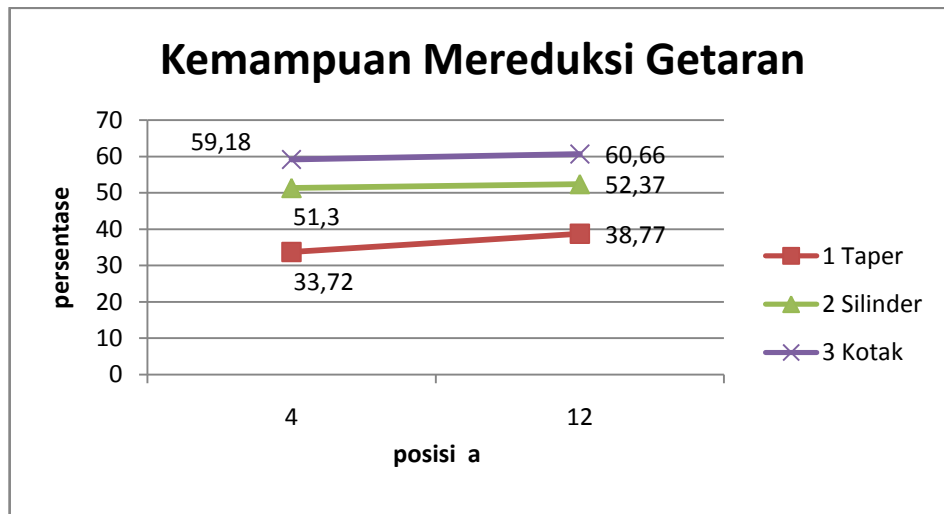
Respon percepatan angular pada pondasi dapat dilihat pada gambar 4.2.(1)(b) untuk $a=4\text{cm}$ dan gambar 4.2 (2)(b) untuk $a=12\text{ cm}$. RMS percepatan angular pada pondasi terdapat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 RMS percepatan angular simulasi pondasi

NO	ELASTOMER	PERCEPATAN ANGULAR (rad/s^2)	
		$a=4\text{ cm}$	$a=12\text{ cm}$
1	Taper	5.049	1.7658
2	Silinder	1.9594	1.2905
3	Kotak	2.0504	1.411

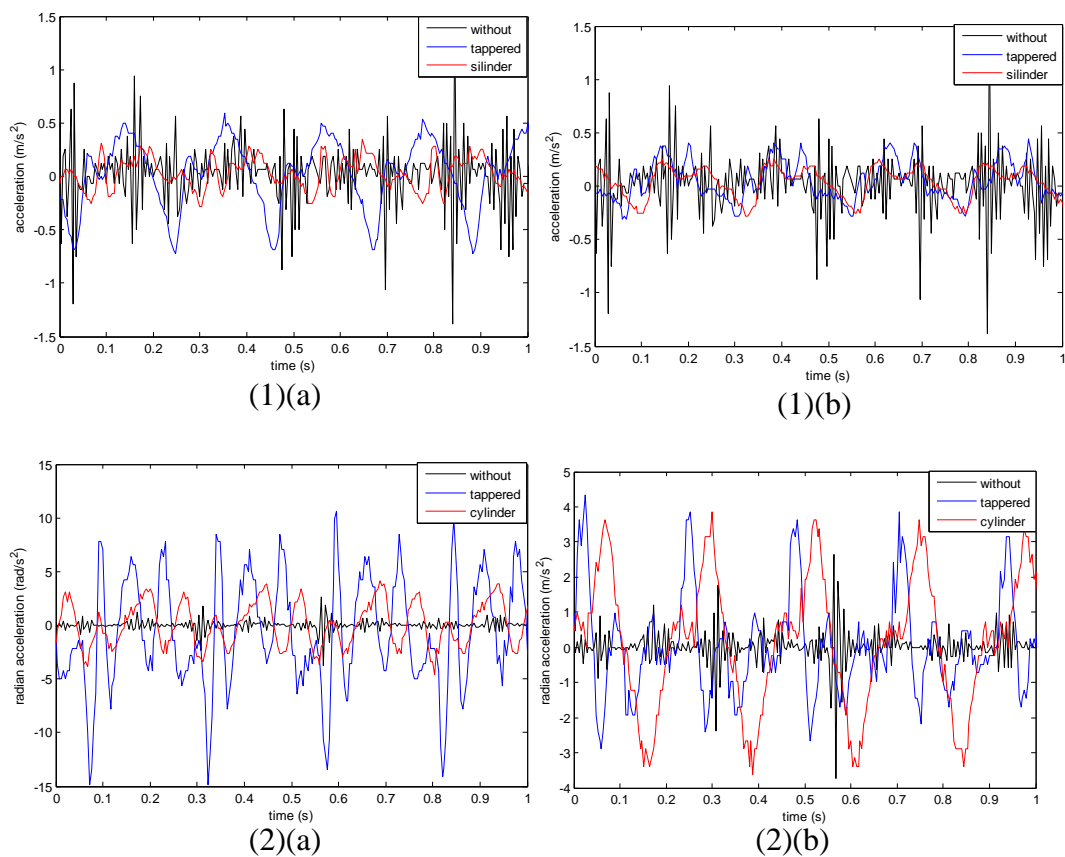
Pada simulasi, RMS percepatan angular elastomer berbentuk taper lebih tinggi daripada elastomer berbentuk silinder dan kotak. Hal ini disebabkan nilai kekakuan dari taper lebih kecil dibandingkan dengan elastomer berbentuk silinder dan kotak. RMS percepatan angular elastomer berbentuk taper adalah 5.05 rad/s^2 ketika $a=4\text{ cm}$ dan $1,77\text{ rad/s}^2$ ketika $a=12\text{ cm}$. RMS percepatan angular lebih kecil ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12\text{cm}$ dikarenakan percepatan angular berbanding terbalik dengan jarak elastomer dari titik pusat massa pada percepatan konstan.

Kemampuan mereduksi getaran pada simulasi dapat dilihat pada gambar 4.3. Pada simulasi, semua bentuk elastomer mampu mereduksi getaran ketika diberi eksitasi 8 Hz baik pada saat elastomer diletakkan pada $a=12\text{ cm}$ maupun $a=4\text{ cm}$. Pada frekuensi kerja 8 Hz , frekuensi kerja berada dibawah frekuensi natural. Kemampuan mereduksi getaran terbesar ketika menggunakan elastomer berbentuk kotak pada $a=12\text{ cm}$. Hal ini disebabkan elastomer berbentuk kotak mempunyai kekakuan lebih besar daripada elastomer berbentuk silinder dan taper. Kemampuan mereduksi getarab dari elastomer kotak yang diletakkan pada posisi $a=12\text{ cm}$ adalah 60.66% .



Gambar 4. 3 Kemampuan meredam getaran pada simulasi

4.2 Analisa Respon Eksperimen pada Pondasi



Gambar 4. 4 Grafik Eksperimen respon percepatan: (1) translasi, (2) angular, pada pondasi ketika: (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm.

Gambar 4.4 (1)(a) merupakan grafik eksperimen respon percepatan translasi pada pondasi untuk $a=4$ cm. Gambar 4.4 (1)(b) merupakan grafik eksperimen respon percepatan angular pada pondasi untuk $a=4$ cm. Gambar 4.4 (2)(a) merupakan grafik eksperimen respon percepatan translasi pada pondasi untuk $a=12$ cm. Gambar 4.4 (2)(b) merupakan grafik eksperimen respon percepatan angular pada pondasi untuk $a=12$ cm. Dari gambar 4.4 didapat nilai RMS yang disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 3 RMS ekeperimen respon pada pondasi

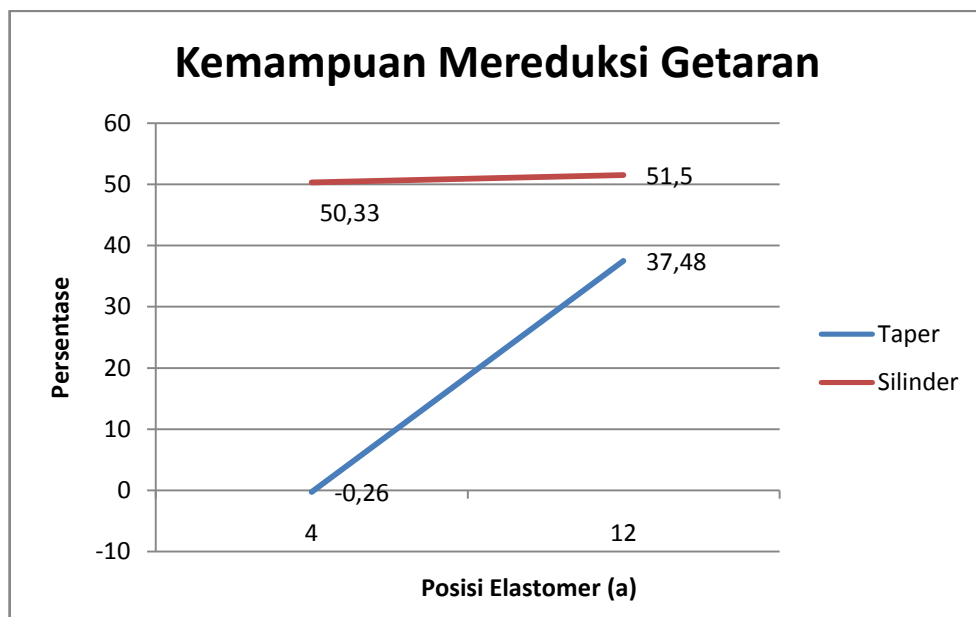
NO	ELASTOMER	PERCEPATAN TRANSLASI (m/s^2)		PERCEPATAN ANGULAR (rad/s^2)	
		a=4 cm	a=12 cm	a=4 cm	a=12 cm
1	Tanpa	0.3074	0.3074	0.5466	0.5466
2	Taper	0.3082	0.1922	5.3203	1.8761
2	Silinder	0.1527	0.1491	2.0522	1.3572

Pada eksperimen, RMS percepatan elastomer berbentuk taper lebih tinggi daripada elastomer berbentuk silinder. Hal ini disebabkan nilai kekakuan dari taper lebih kecil dibandingkan dengan elastomer berbentuk silinder. RMS percepatan untuk elastomer berbentuk taper adalah $0.31 m/s^2$ ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=4$ cm dan $0.19 m/s^2$ ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12$ cm. Pada elastomer berbentuk taper ini terjadi perbedaan respon percepatan yang sangat signifikan antara ketika elastomer diletakkan pada $a=4$ cm dengan ketika elastomer diletakkan pada $a=12$ cm. Perbedaan respon yang signifikan ini disebabkan karena ketika dipasang elastomer taper pada posisi elastomer $a=4$ cm, frekuensi kerja pondasi sedikit di atas frekuensi natural sistem. RMS respon percepatan lebih kecil ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12$ cm. Pada $a=12$ cm, frekuensi natural pondasi lebih besar daripada frekuensi natural ketika $a=4$ cm.

Pada simulasi, RMS respon percepatan angular elastomer berbentuk taper lebih tinggi daripada elastomer berbentuk silinder dan kotak. Hal ini disebabkan nilai kekakuan dari taper lebih kecil dibandingkan dengan elastomer berbentuk

silinder dan kotak. RMS respon percepatan angular elastomer berbentuk taper besarnya adalah 5.32 rad/s^2 ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=4 \text{ cm}$ dan 1.88 rad/s^2 ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12 \text{ cm}$. RMS percepatan angular lebih kecil ketika elastomer diletakkan pada posisi $a=12 \text{ cm}$ dikarenakan percepatan angular berbanding terbalik dengan jarak elastomer dari titik pusat massa pada percepatan konstan.

Kemampuan mereduksi getaran pada simulasi dapat dilihat pada gambar 4.5. Pada simulasi, semua bentuk elastomer mampu mereduksi getaran ketika diberi eksitasi 8 Hz baik pada saat elastomer diletakkan pada $a=12 \text{ cm}$ maupun $a=4 \text{ cm}$. Pada frekuensi kerja 8 Hz, frekuensi kerja berada dibawah frekuensi natural. Kemampuan mereduksi getaran terbesar ketika menggunakan elastomer berbentuk kotak pada $a=12 \text{ cm}$. Hal ini disebabkan elastomer berbentuk kotak mempunyai kekakuan lebih besar daripada elastomer berbentuk silinder dan taper.



Gambar 4. 5 Kemampuan Mereduksi Getaran Eksperimen

4.3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

Setelah menganalisa respon dinamis sistem baik simulasi maupun eksperimen, langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil RMS respon percepatan antara RMS respon percepatan simulasi dengan RMS respon

percepatan eksperimen. Perbandingan RMS respon percepatan simulasi dan eksperimen dapat dilihat pada tabel 4.4. Sedangkan perbandingan RMS respon percepatan angular simulasi dan eksperimen disajikan pada tabel 4.5.

Tabel 4. 4 Perbandingan simulasi dan eksperimen RMS respon percepatan

NO	ELASTOMER	SIMULASI		EKSPERIMEN		% PERBANDINGAN	
		a=4 cm	a=12 cm	a=4 cm	a=12 cm	a=4 cm	a=12 cm
1	TAPER	0.1968	0.1818	0.3082	0.1922	36.14536	5.41103
2	SILINDER	0.1446	0.1414	0.1527	0.1491	5.304519	5.164319
3	TANPA	0.2969	0.2969	0.3074	0.3074	3.415745	3.415745

Tabel 4. 5 Perbandingan simulasi dan eksperimen RMS respon percepatan angular

NO	ELASTOMER	SIMULASI		EKSPERIMEN		PERBANDINGAN	
		a=4 cm	a=12 cm	a=4 cm	a=12 cm	a=4 cm	a=12 cm
1	TAPER	5.049	1.7658	5.3203	1.8761	5.099337	5.879218
2	SILINDER	1.9594	1.2805	2.0522	1.3572	4.521976	5.651341

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Pada simulasi penurunan terbesar terjadi ketika posisi elastomer pada $a=12$ cm, yaitu:
 - a. Untuk elastomer berbentuk kotak dari 0.2969 m/s^2 menjadi 0.1818 m/s^2
 - b. Untuk elastomer berbentuk silinder dari 0.2969 m/s^2 menjadi 0.1414 m/s^2
 - c. Untuk elastomer berbentuk taper dari 0.2969 m/s^2 menjadi 0.1168 m/s^2
2. pada eksperimen penurunan terbesar terjadi ketika posisi elastomer pada $a=12$ cm, yaitu
 - a. Untuk elastomer berbentuk taper dari 0.5466 m/s^2 menjadi 1.8761 m/s^2
 - b. Untuk elastomer berbentuk silinder dari 0.5466 m/s^2 menjadi 1.3572 m/s^2

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan elastomer dengan bahan dan variasi ukuran elastomer yang lain dengan volume tetap.
2. Sebelum eksperimen dilakukan perlu dilakukan kalibrasi alat-alat ukur yang akan digunakan.
3. Meja getar perlu ditinjau lagi desainnya sehingga dapat bekerja pada rentang frekuensi yang panjang.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

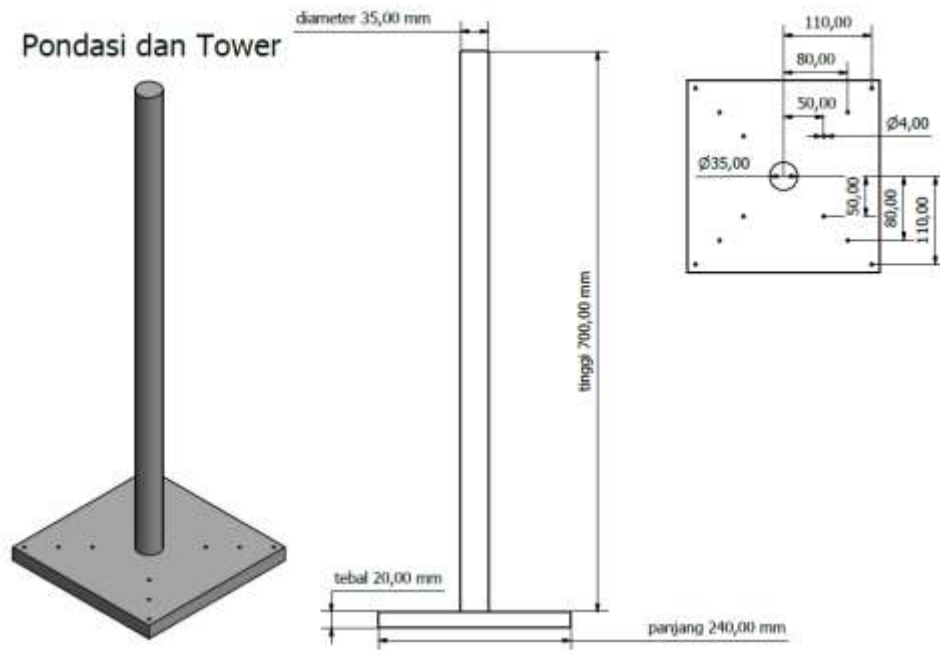
1. Rencana Umum Energi Nasional. *www.den.go.id*. [Online]
2. **Irawati, Suciana Dwi.** *kompasiana. www.kompasiana.com*. [Online] 31 Desember 2015. https://www.kompasiana.com/suciana/energi-terbarukan-untuk-berdikari-energi-indonesia_56843fbdd77a61e1068b4581.
3. *Theoritical Analysis of Wind Turbine Tower-Nacelle Axial Vibration Based on the Mechanical Impedance Method.* **Xiaohui, Dong.** Yangcheng, China : <http://www2.tku.edu.tw>, 2016, Vol. 19.
4. *Ant Colony Optimization of Tuned Mass Dampers for Earthquake Oscillations of High-rise Structures Including Soil-structure Interaction.* **Farshidianfar, Anooshiravan dan Saeed, Soheili.** 2013, Vol. 51. pp. 14-22.
5. *Desain and Characteristics of High Damping Natural Rubber Bearinga for Base Isolation.* **Malek, K.A.; Basir, K.B.;** Transaction on the Built Environment, Malaysia : www.witpress.com, 2001, Vol. 57.
6. *Application of Base Isolation for Flexible Building.* **Jain, Sarvesh K.; Thakkar, Sashi K.;** Canada : 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.
7. *Measurement of Ground Borne Vibratons for Foundation Design and Vibration Isolation of High-precision Instrument.* **Ulgen, D.; Ertugrul, O.L.; Ozkan, M.Y.;** Turkey : Elsivier Ltd, 2016.
8. *Study on Erathquake Resistant Building-(Base Isolation).* **Tamang, Prashika; Gupta, Bijay Kumar; Rai, Bidisha; Bhutia, Karsang Chukey; Sherpa, Chungku.;** South Sikkim, India : International Journal of Engineering and Technology (IJETT), 2016, Vol. 33.
9. **Caterino, N; Georgakis, C.T; Trinchillo, F; Occhiuzzi, A.;** A Semi-active Control System for Wind Turbines. [pengar. buku] N Luo, Y Vidal dan L Acho. *Wind Turbine Control and Monitoring (Advances in Industrial Control).* s.l. : Springer International Publishing, 2014.

10. *A Procedure for Parametric Identification of Viscoelastic Dampers Accounting for Preload*. **Neto, Francisco Paulo Léopore**. Uberlandia, MG, Brazil : ABCM, 2011.
11. *Mechanical Vibrations Fifth Edition*. **Rao, Singiresu**. Amerika : Prentice Hall, 2011.
12. <http://www.directindustry.com>. [Online] 2017.
<http://www.directindustry.com/prod/tmc/product-21701-1711951.html>.
13. <https://www.news-medical.net>. [Online] https://www.news-medical.net/Accurions-halcyonics_nano-series-Active-Vibration-Isolation-System.
14. KURASHIKI KAKO CO., LTD. <https://www.kuraka.co.jp>. [Online]
https://www.kuraka.co.jp/en/technology/develop/vibration_isolation/index.html.
15. Advanced Mechanical Engineering Solutions. <http://www.amesweb.info>.
[Online]
<http://www.amesweb.info/Guidelines/VibrationControlIsolationSystems.aspx>.
16. satuenergi. <http://www.satuenergi.com>. [Online] 2015.
<http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>.
17. benergi. www.benergi.com. [Online] <http://www.benergi.com/jenis-turbin-angin-lengkap-dengan-kekurangan-dan-kelebihannya>.
18. *Viscoelastic Damping 01*. **Macioce, Paul**. s.l. : Rousb Industries, Inc.
19. *The Basics of Vibration Isolation Using Elastomeric Materials*. **Frankovich, David**. Indianapolis, Indiana : E-A-R.

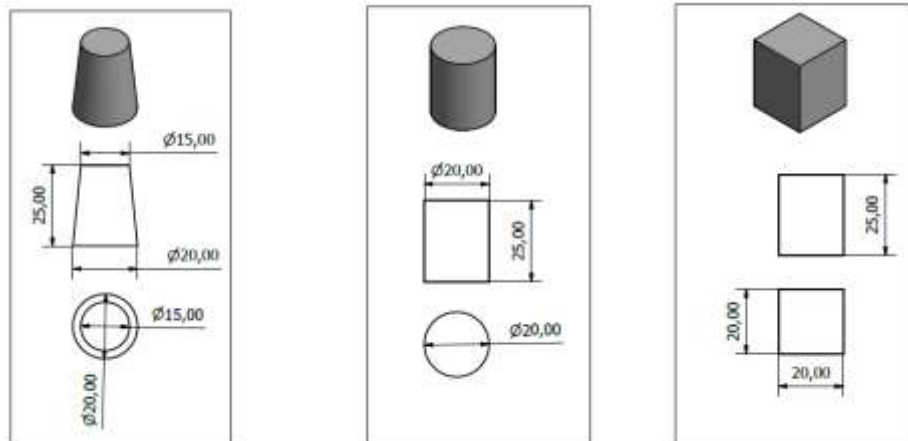
LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar teknik alat uji

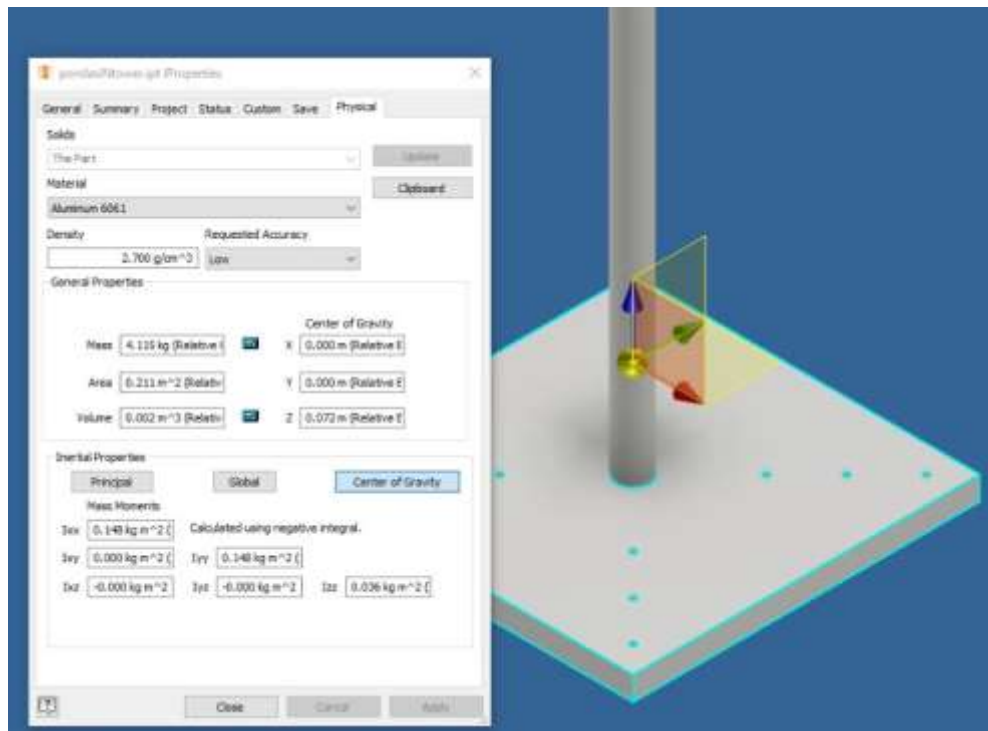
- Pondasi dan tower



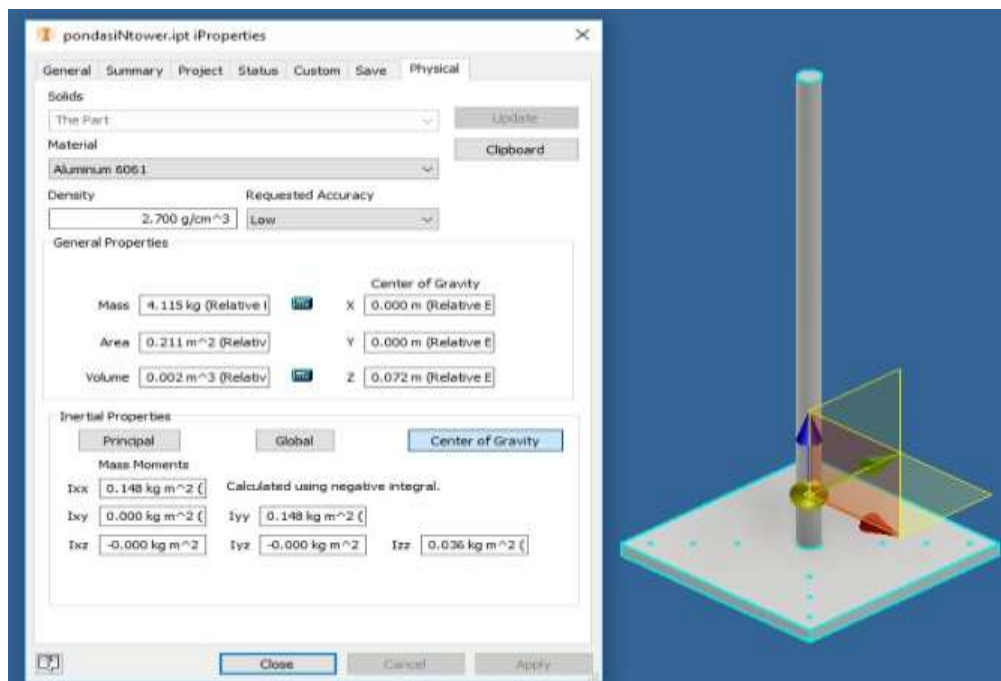
- Elastomer



Lampiran 2 Menentukan Centre of Gravity

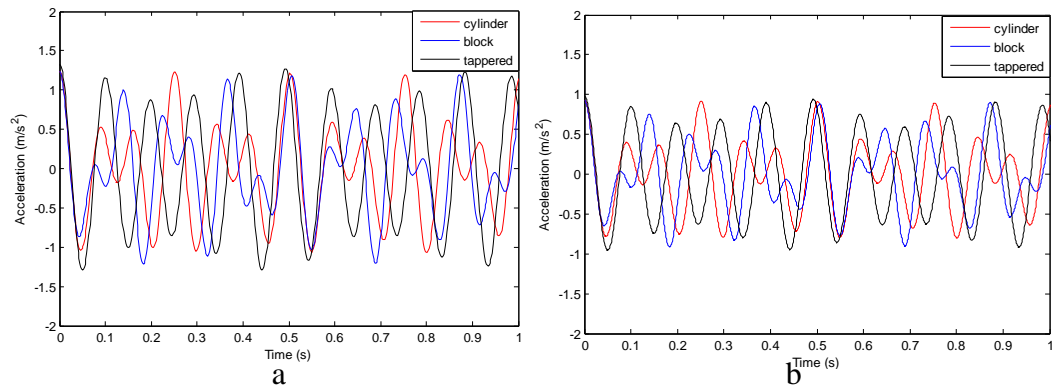


Lampiran 3 Menentukan momen inersia

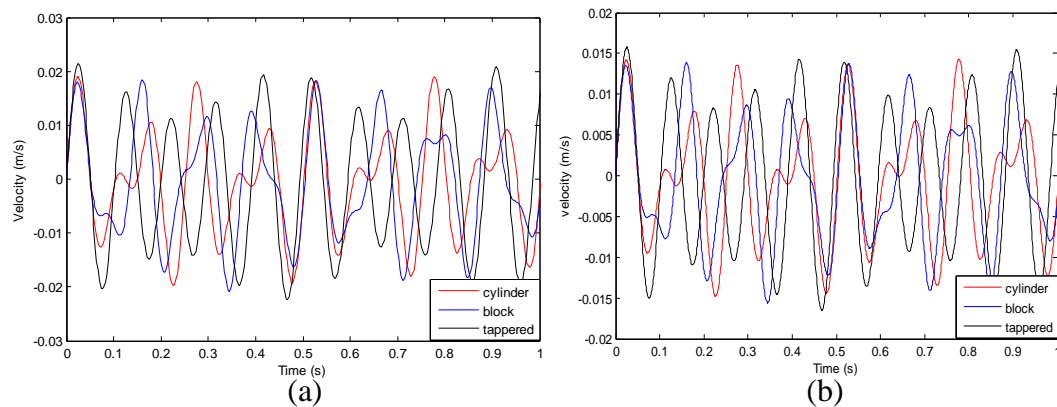


Lampiran 4 Grafik simulasi respon percepatan, kecepatan dan perpindahan pada *shaker*

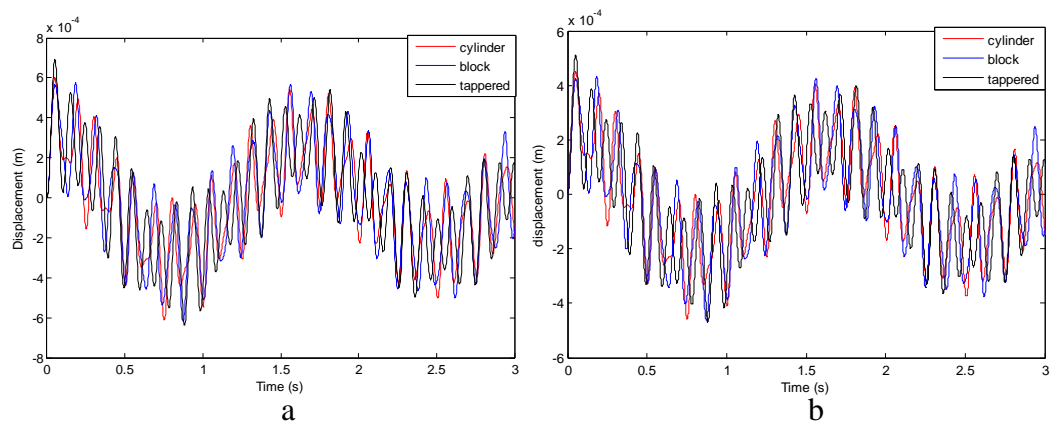
- Grafik respon percepatan pada *shaker* (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm



- Grafik respon kecepatan pada *shaker* (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm

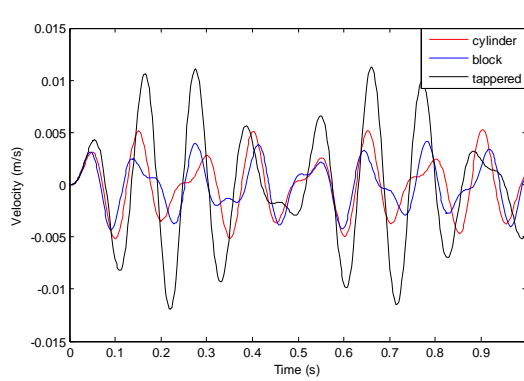


- Grafik respon perpindahan pada *shaker* (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm

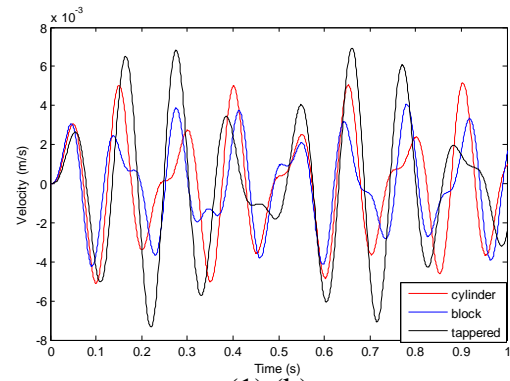


Lampiran 5 Grafik simulasi respon percepatan dan kecepatan pada pondasi

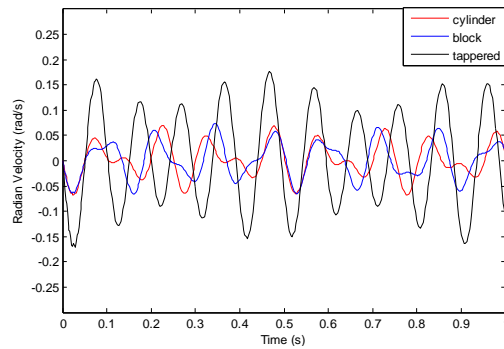
- Grafik simulasi respon kecepatan (1) translasi dan (2) sudut pada pondasi ketika (a) $a=4$ cm dan (b) $a=12$ cm.



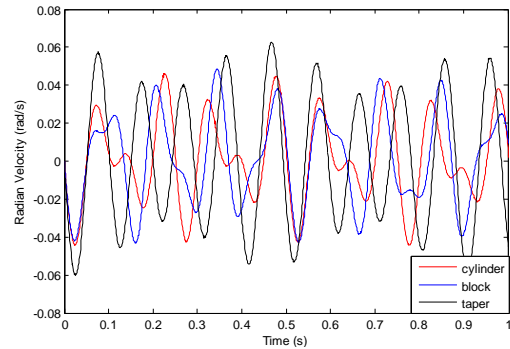
(1) (a)



(1) (b)

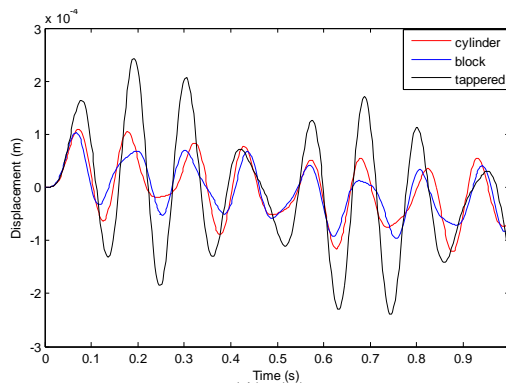


(2) (a)

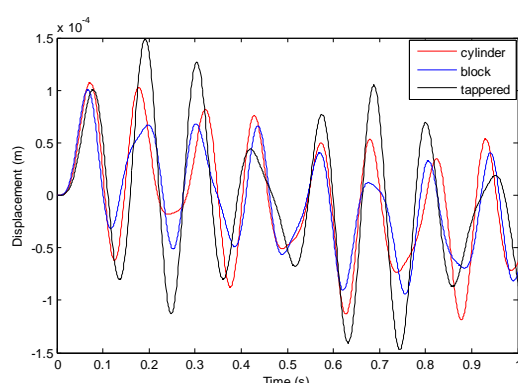


(2) (b)

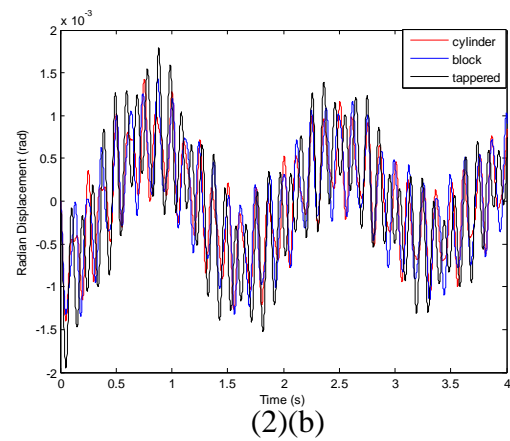
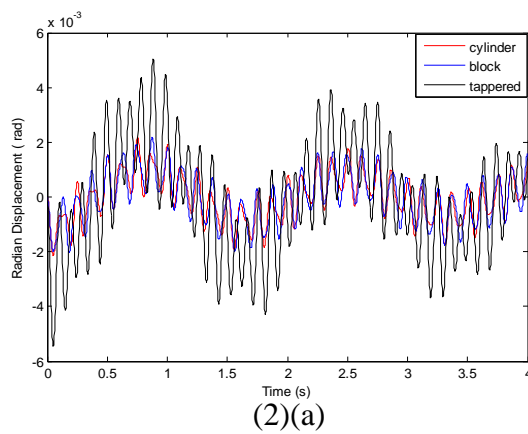
- Grafik simulasi respon percepatan (1) translasi dan (2) sudut pada pondasi ketika (a) $a=4$ cm dan (b) $a=12$ cm.



(1) (a)

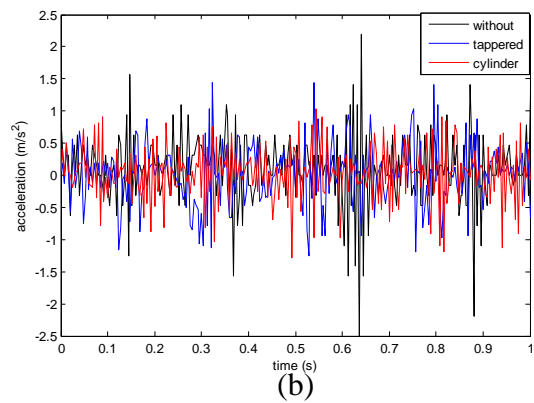
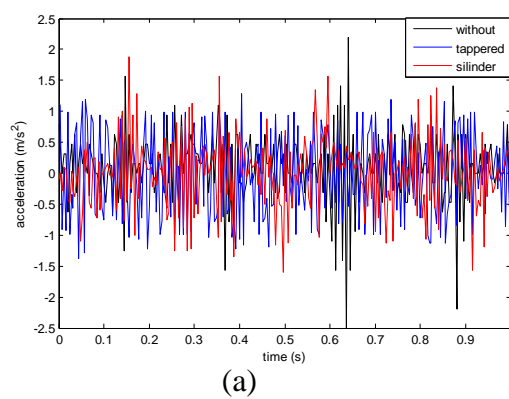


(1) (b)



Lampiran 6 Grafik eksperimen respon percepatan, kecepatan dan perpindahan pada *shaker*

- Grafik respon percepatan pada *shaker* (a) $a=4$ cm, (b) $a=12$ cm



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Elisa Sulistyorini dilahirkan di Duri, 22 Januari 1986 seorang anak yang terlahir dari orangtua terhebat bernama Priyono dan Nurhayati. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN 007 Mandau pada tahun 1992-1998. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPS Cendana Mandaupada tahun 1998-2001 kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAS Cendana Mandau pada tahun 2001-2004. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur Kemitraan pada tahun 2004 dan lulus pada tahun 2010. Tahun 2016 penulis melanjutkan studi magisternya di Departemen Teknik Mesin ITS dengan bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal.

Penulis aktif dalam kegiatan organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff hubungan luar di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) pada tahun 2005-2006 dan menjadi Sekretaris I Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) pada tahun 2006-2007. Penulis Pernah bekerja di P.T. Multi Struktur Sarana sebagai kepala bagian dari *Repair and Maintenance* pada tahun 2012. Pada tahun 2015 penulis bekerja di P.T. Primaindo Jaya Persada sebagai staf QC.

Motto hidup penulis “Eat failure, and you will know the taste of success” membuat penulis pantang menyerah dalam berjuang. Untuk semua informasi dan masukan terkait Tesis ini dapat menghubungi penulis melalui email sulistyorini.elisa@gmail.com